

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA STROJNÍ
KATEDRA MATERIÁLU

Studijní program: M2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2303 T 002 Strojírenská technologie

Zaměření: Materiálové inženýrství

Optimalizace měřicího cyklu přístroje CASTA

Measuring cycle optimization of the instrument CASTA

KMT – 264

Pavel Lhoták

Vedoucí práce: doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Konzultant:

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	81
Počet tabulek:	30
Počet obrázků:	22
Počet grafů:	13

Datum: 28. 5. 2010



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení	Pavel L H O T Á K
studijní program	M2301 Strojní inženýrství
obor	2303 T 002 Strojírenská technologie
zaměření	Materiálové inženýrství

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

Optimalizace měřicího cyklu přístroje CASTA KMT - 264

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Seznamte se s principem měření metodou magnetické skvrny a s technickou dokumentací přístrojů DOMENA, CASTA. Prostudujte zahraniční literaturu o této metodě.
2. Zprovozněte na PC program „test“ a měňte hodnoty parametru pracovního cyklu na souboru vzorků s různou strukturou.
3. Analyzujte soubory výsledků – výběr nejvhodnějšího pracovního nastavení pro diagnostiku litin, tvrzených vrstev a zušlechťení na oceli (litině).
4. Vyvoďte důležité poznatky pro nedestruktivní strukturoskopii přístrojem CASTA.

Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva v rozsahu 40- 50 stran

- přílohy

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

[1] Kreidl, M., Šmíd, R. Technická diagnostika. BEN technická literatura, 4. díl, Praha 2006, ISBN 80-7300-158-6.

[2] Skrbek, B. Metoda magnetické skvrny. Teze profesorské přednášky, Liberec 2008, ISBN 978-80-7372-428-3.

[3] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu*. 1. vydání. Nakladatelství CERM s. r. o.: Brno 1999. ISBN 80 – 7204 – 130 – 4.

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Konzultant diplomové práce:

L.S.

doc. Ing. František STUHLÍK, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Petr LOUDA, CSc.
děkan

V Liberci dne 31. 10. 2009

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ)
Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI Fakulta strojní

Katedra materiálu

Studijní program: M 2301 Strojní inženýrství

Diplomant: Pavel Lhoták

Téma práce: Optimalizace měřicího cyklu přístroje CASTA

Optimization of the measuring cycle the instrument CASTA

Číslo DP: KMT – 264

Vedoucí DP: doc. Ing. Břetislav Skrbek, CSc.

Konzultant:

Abstrakt:

Tato práce se zabývá měřením a optimalizací parametrů měření přístroje CASTA. Za cíl si klade zhodnotit současný stav přístroje a měřicího cyklu a možnosti dalšího použití v průmyslu i laboratoři, porovnat naměřené hodnoty s hodnotami získanými měřením přístrojem DOMENA a navrhnout nové funkce pro konstrukci modernější verze strukturoskopu CASTA.

Abstract:

This thesis inquires into measurement and optimization of the parameters of measuring instrument CASTA. Its objective consists in evaluating current condition of instrument, measuring cycle and another possible appliance in industry and laboratory. Another objective consists in comparing measured values with values measured by instrument DOMENA and suggests new functions for construction of more advanced version of structuroscope CASTA.

Klíčová slova:

Strukturoskopický přístroj, Metoda magnetické skvrny,

Keywords:

Structuroscopic instrument, Magnetic spot method,

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 28. května 2010

.....
Pavel Lhoták

Poděkování:

Na tomto místě chci poděkovat především panu doc. Ing. Břetislavu Skrbkovi, CSc. za jeho velice cenné rady a důležité postřehy ohledně měření a zpracování této diplomové práce.

Obsah

1 Úvod	9
2 Teoretická část	9
2.1 Magnetické pole	9
2.1.1 Historie	10
2.1.2 Zdroje magnetického pole	10
2.1.3 Základní magnetické veličiny	11
2.1.4 Dělení látek podle chování v magnetickém poli	14
2.2 Defektoskopie	18
2.2.1 Základní defektoskopické metody	19
2.3 Strukturoskopie	27
2.3.1 Akustické metody zkoušení	27
2.3.2 Metody vířivých proudů	29
2.3.3 Magnetické a elektromagnetické metody	29
2.4 Princip metody magnetické skvrny	44
2.5 Přístroj DOMENA B3.b	45
2.5.1 Popis přístroje	45
2.5.2 Popis měření	46
2.6 Přístroj CASTA	47
3 Experimentální část	49
3.1 Měřené vzorky	49
3.2 Postup připojení přístroje CASTA k počítači	50
3.3 Měření přístrojem CASTA	51
3.3.1 Optimální počet pulzů a opakovatelnost měření	54
3.3.2 Nabíjení pracovního kondenzátoru	58
3.4 Měření přístrojem DOMENA B3.b	59
3.5 Porovnání hodnot naměřených oběma přístroji	60
3.6 Původní měření	65
3.6.1 Vzorky původních měření	65
3.6.2 Posouzení vlivu rozdílných hodnot vnesené energie	66
3.6.3 Magnetická relaxace materiálu	68
3.6.4 Určení vzorců k výpočtu tvrdosti a u litin obsahu perlitu	70
3.6.5 Odhad totožnosti neznámých materiálů	74
3.6.6 Cejchování přístroje CASTA	75
4 Diskuse výsledků a shrnutí	76
5 Závěr	78
Použitá literatura	79

Seznam použitých zkratk a symbolů:

Symbol [jednotka]	Název
B [T]	Magnetická indukce
B _e [T]	Indukce vnějšího magnetického pole
B _m [T]	Vnitřní magnetická indukce objektu
B _{m1} [T]	Vnitřní magnetická indukce etalonu
B _{m2} [T]	Vnitřní magnetická indukce kontrolovaného výrobku
B _r [T]	Remanentní indukce
B _s [T]	Indukce nasycení
c _L [m·s ⁻¹]	Rychlost zvuku
c _{L0} [m·s ⁻¹]	Rychlost zvuku ocelové matrice = 5920 m·s ⁻¹
ČG	Červíkový grafit
D ₍₀₎ [-]	Demagnetizační činitel součásti
f [Hz]	Frekvence
H [A·m ⁻¹]	Intenzita magnetického pole
HB	Tvrdost podle Brinella
H _e [A·m ⁻¹]	Intenzita vnějšího magnetického pole
H _c [A·m ⁻¹]	Koercivita
H _r [A·m ⁻¹]	Remanentní intenzita magnetického pole součásti
HRC	Tvrdost podle Rockwella
I [A]	Elektrický proud
J [T]	Magnetická polarizace
J _r [T]	Remanentní magnetická polarizace
KG	Kuličkový grafit
L [m]	Přímá dráha
LČG	Litina s červíkovým grafitem
LG	Lupínkový grafit

LKG	Litina s kuličkovým grafitem
LLG	Litina s lupínkovým grafitem
Lu [m]	Akustická dráha
L/D [-]	Poměr délky k průměru součásti
M [V]	Napětí na Hallově sondě (též „zbytková magnetizace“)
$M_a [A \cdot m^{-1}]$	Magnetizace
$M_{1-2} [V]$	Rozdíl napětí na Hallově sondě mezi 1. a 2. pulzem
r [m]	Poloměr vzdálenosti
$r_1 [m]$	Vnitřní poloměr trubky
$r_2 [m]$	Vnější poloměr trubky
$R_m [H^{-1}]$	Magnetický odpor (reluktance)
S [m ²]	Plošný obsah
t [s]	Čas
$U_c [V]$	Napětí kondenzátoru
$\Delta U_c [V]$	Změna napětí na kondenzátoru
$\eta [-]$	Magnetické stínění
$\kappa [-]$	Magnetická susceptibilita
$\lambda [m]$	Vlnová délka
$\mu [H \cdot m^{-1}]$	Permeabilita prostředí
$\mu_{ef} [-]$	Efektivní permeabilita tvaru
$\mu_{max} [H \cdot m^{-1}]$	Lokální maximum permeability prostředí
$\mu_r [H \cdot m^{-1}]$	Permeabilita vakua $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} H \cdot m^{-1}$
$\mu_0 [-]$	Poměrná (relativní) permeabilita prostředí
$\pi [-]$	Ludolfovo číslo
$\Phi [Wb]$	Magnetický indukční tok
$\bar{M} [V]$	Průměrná hodnota M provedených měření
$\bar{M}_1 [V]$	Průměrná hodnota M po prvním pulzu

1 ÚVOD

Současná snaha zúžit tolerance předepsaných strukturních a mechanických vlastností strojírenských výrobků a polotovarů a časté požadavky 100% kontroly i v hromadné výrobě si vyžadují rychlé, spolehlivé a přesné prostředky nedestruktivní defektoskopie a strukturoskopie. Dnes se výrobky obvykle kontrolují magnetickými a ultrazvukovými strukturoskopickými metodami. Metoda magnetické skvrny, v české odborné terminologii též nazývaná metodou magnetického bodového pólu, umožňuje místní stanovení parametrů struktury. Nezřídka je totiž vyžadována (a zpravidla plně postačuje) právě znalost hodnot mechanických a strukturních vlastností v kriticky namáhaném průřezu. Magnetická skvrna je důsledkem místní obvykle impulzní magnetizace. [1] [2]

Současné komerčně vyráběné strukturoskopy řady DOMENA navazují na starší přístroje REMAG a několikaletý výzkum této metody. Pro další rozvoj a získání nových poznatků o magnetické skvrně byl navržen přístroj CASTA. Ten nabízí prostřednictvím připojení k počítači v uživatelsky příjemném prostředí možnost nastavení většího množství hodnot ovlivňujících parametry měření. Lze sledovat změnu zbytkového magnetismu po jednotlivých pulzech v libovolném časovém úseku.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Magnetické pole

Magnetické pole je silové pole, které vzniká v prostoru kolem pohybujících se elektrických nábojů, například kolem vodiče, kterým prochází elektrický proud, nebo v okolí permanentního magnetu. Z hlediska časové proměnnosti může být pole magnetostatické, nebo magnetodynamické. Pole lze charakterizovat magnetickými indukčními siločarami, což jsou myšlené spojitě křivky, které v případě permanentního magnetu vycházejí ze severního pólu a vstupují do jižního pólu. Magnetické pole je vírové, neboť siločáry jsou uzavřené křivky. Tečna magnetické siločáry v jejím libovolném bodě udává směr vektoru magnetické indukce. [3]

2.1.1 Historie

První zmínky o magnetizmu sahají podle některých pramenů již do staré Číny, kde počátkem 2. tisíciletí př. n. l. byl magnetický jev využíván k výrobě jednoduchých kompasů. Dále pak v 6. století př. n. l. řecký filozof a matematik Tháles z Miletu popisuje magnetizmus jako přitažlivost některých druhů železné rudy ke kusům čistého železa.

Za průkopníka tohoto oboru fyziky je však považován anglický učenec, lékař královny Alžběty I., William Gilbert (1544 - 1603). Právě on zavedl pojem magnetické pole. Odhalil dva póly magnetu i to, že se vzájemně přitahují, nebo odpuzují. Dále zjistil, že při určitých teplotách feromagnetické látky ztrácejí své magnetické vlastnosti. Objevil také magnetickou indukci, jejíž jednotka později převzala název po fyzikovi Nikolu Teslovi. [3]

V roce 1789 dospěl Ch. A. Coulomb k představě koercitivní síly a to na základě "magnetického množství", které obsahuje každý magnet.

Souvislost mezi elektřinou a magnetizmem objevil dánský fyzik Hans Christian Oersted (1777 - 1851). Pomocí magnetky zjistil existenci magnetického pole v blízkém okolí vodiče protékaného proudem.

Dalšími vědci, kteří se významně zabývali teorií elektromagnetického pole, byli především Michael Faraday (1791 - 1867), či James Clerk Maxwell (1831 - 1879). [4]

2.1.2 Zdroje magnetického pole

Zdrojem magnetického pole permanentního magnetu je pohyb elektronů ve struktuře materiálu. Elektrony kromě pohybu okolo jádra atomu rotují i kolem své osy. Tento pohyb, který je označován jako spin, je příčinou magnetického pole. V látce tak vzniknou elementární magnety, které jsou tvořeny dvěma opačnými spiny elektronů. [4]

Zdrojem magnetického pole elektromagnetu je protékající elektrický proud, tedy usměrněný pohyb elektronů. Mezi magnetickým polem permanentního magnetu a polem vodiče protékaného proudem není kvalitativní rozdíl. Obě tyto pole lze tedy navzájem skládat. Z toho plyne, že např. Účinek permanentního magnetu lze zesílit nebo zeslabit magnetickým polem vodiče s proudem. [4]

2.1.3 Základní magnetické veličiny

Magnetické pole lze popsat níže uvedenými magnetickými veličinami.

Magnetická indukce B je vektorová veličina charakterizující magnetické pole. Jednotkou magnetické indukce je Tesla [T]. Číselně se tato jednotka rovná síle o velikosti jednoho newtonu, která působí na jednotku délky přímého vodiče protékaného proudem o velikosti jednoho ampéru a orientovaného kolmo ke směru B . Magnetická indukce také udává hustotu magnetického indukčního toku na jednotku kolmé plochy dle rovnice (1).

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (1)$$

Kde je:

Φ ... magnetický indukční tok [Wb]

S ... plošný obsah [m²]

Magnetický indukční tok Φ je skalární veličina definovaná napětím indukovaným v závitu při časové změně toku dle vztahu (2). Jednotkou magnetického indukčního toku je weber [Wb].

$$u = \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

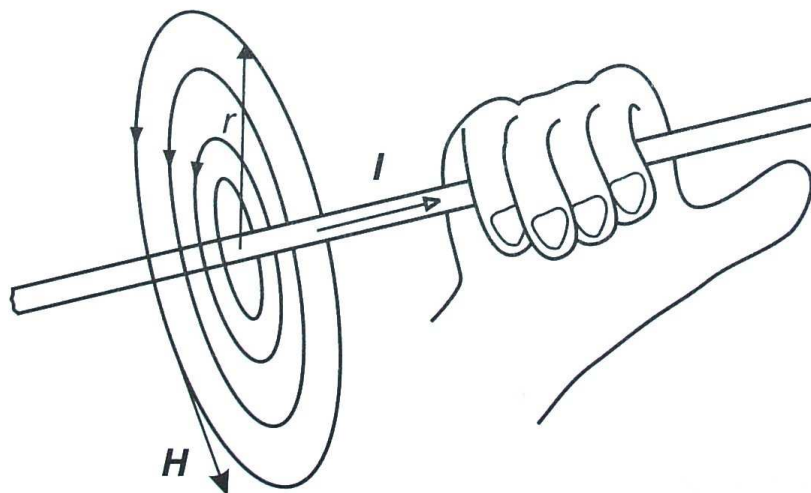
Intenzita magnetického pole H je vektorová veličina. Jednotkou intenzity magnetického pole je [A·m⁻¹]. Intenzita pole ve vzdálenosti r od vodiče protékaného proudem I je dána vztahem (3) a znázorněna na obr. 2.1. Mezi intenzitou magnetického pole a indukcí platí vztah (4).

$$H = \frac{I}{2\pi r} \quad (3)$$

Kde je:

I ... elektrický proud [A]

r ... vzdálenost od vodiče [m]



Obr. 2.1 Směr siločar magnetického pole dle pravidla pravé ruky [5]

$$B = \mu_0 * \mu_r * H \quad (4)$$

Kde je:

μ_r ... poměrná (relativní) permeabilita prostředí [-]

μ_0 ... permeabilita vakua = $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$

Permeabilita prostředí je součin relativní (poměrné) permeability prostředí μ (což je bezrozměrné číslo udávající kolikrát je magnetická indukce v dané látce větší než je indukce ve vakuu) a permeability vakua μ_0 . Látky, u nichž je $\mu > 1$, se označují jako paramagnetické, látky, u nichž je $\mu < 1$, se označují jako diamagnetické a látky feromagnetické mají $\mu \gg 1$. Pro vakuum a prakticky i pro vzduch je $\mu = 1$.

Magnetizace M_a je vektor, který představuje na základě teorie dipólů fyzikálně intenzitu pole uvnitř tělesa vyvolanou jeho magnetickými vlastnostmi a je definovaný vztahem (5). Jednotkou magnetizace je $[\text{A} \cdot \text{m}^{-1}]$.

$$M_a = \frac{B}{\mu_0} - H \quad (5)$$

Magnetický odpor (reluktance) R_m je odpor, který objekt klade magnetickému toku podobně jako elektrický odpor elektrickému proudu. Jednotkou reluktance je $[H^{-1}]$ (henry $[H]$ je jednotka indukčnosti).

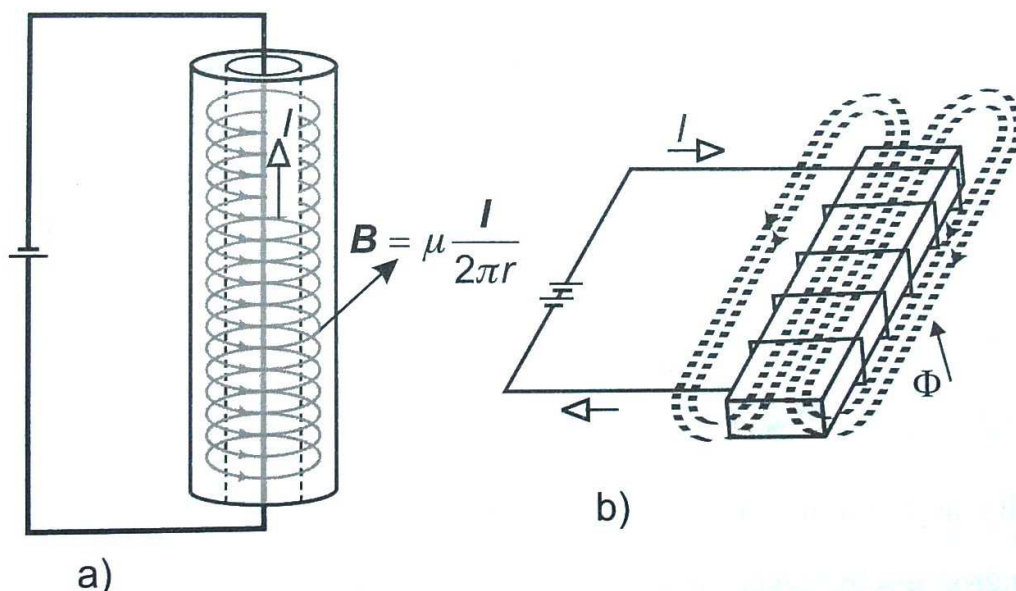
Polarizace J je vektor, který podobně jako magnetizace vyjadřuje změnu pole vyvolanou magnetickými vlastnostmi látek. Jednotkou polarizace je $[T]$. Umístíme-li feromagnetický objekt do oblasti externího magnetického pole o indukci B_e (6), způsobí toto pole v objektu magnetizaci M_a a indukci B_m . Výsledné pole bude mít indukci danou vztahem (7), neboli magnetická indukce B_m vzniká v důsledku polarizace J feromagnetického materiálu. Polarizace v tělese je způsobena orientací elementárních magnetů (domén), vytvořených pohybem elektrických nábojů uvnitř molekuly.

$$B_e = \mu_0 H \quad (6)$$

$$B = B_e + B_m = B_e + J \quad (7)$$

Také platí:

$$J = B - \mu_0 H = \mu_0 M_a = (\mu - 1)\mu_0 H \quad (8)$$



Obr. 2.2 Indukční čáry a) ve feromagnetické trubce způsobené proudem protékajícím vodičem umístěným uvnitř trubky, b) ve feromagnetickém materiálu umístěném v cívce protékané proudem [5]

Magnetická susceptibilita κ je bezrozměrný koeficient úměrnosti mezi magnetickou polarizací J a indukcí B_e dle vztahu (9).

$$J = \kappa * B_e \quad (9)$$

Z uvedeného vyplývá:

$$\kappa = \mu - 1 \quad (10)$$

2.1.4 Dělení látek podle chování v magnetickém poli [6]

Magnetické vlastnosti látek

Elektrony v atomární struktuře každé látky vytváří magnetický moment svým orbitálním pohybem (oběhem kolem jádra atomu) a spinem (rotací kolem vlastní osy). Na velikost vytvářeného momentu má vliv hlavně spin elektronů. Jev si lze představit tak, že se v každé molekule látky vytvářejí proudové smyčky s orientovanými magnetickými momenty. Magnetické momenty od jednotlivých molekul se mohou vzájemně kompenzovat, nebo slabě podporovat nebo vytvářet v makrooblastech, nazývaných domény, jednotně orientované magnetické zóny s výrazným magnetickým momentem.

Na základě tohoto chování látek v magnetickém poli lze rozdělit do tří skupin na látky:

- diamagnetické
- paramagnetické
- feromagnetické

Základním kritériem rozhodujícím o náležitosti dané látky do některé z těchto skupin je poměrná permeabilita, případně magnetická susceptibilita.

Látky diamagnetické

U látek diamagnetických se vytvářejí dvojice molekulárních proudových smyček, jejichž magnetické momenty jsou stejně velké a působí proti sobě. Při zařazení vnějšího magnetického pole je v molekulárních proudových

smyčkách indukováno napětí, které zesiluje proud té proudové smyčky, jejíž moment má opačnou orientaci než vnější pole, kdežto proud druhé smyčky zeslabuje, takže výsledný moment má opačnou orientaci než vnější pole. To má za následek, že se tyto látky chovají tak, že jsou z nehomogenního pole slabě vypuzovány, v homogenním poli se malý váleček z této látky natáčí kolmo ke směru vnějšího pole. Mezi představitele diamagnetických látek patří měď, stříbro, zlato, kamenná sůl nebo křemen.

Látky paramagnetické

U paramagnetických látek existuje trvalý moment atomů (mají částečně nevykompenzovaný spinový magnetický moment). Vnější pole sice vyvolá diamagnetický efekt, avšak ten je slabší, než trvalý moment atomů. Paramagnetická látka je proto do gradientního pole slabě vtahována a váleček z této látky se natáčí ve směru vnějšího homogenního pole. Síly působící na paramagnetické (i diamagnetické) látky jsou velmi nízké. Mezi paramagnetické látky patří např. hliník, platina, kyslík a další.

Látky feromagnetické

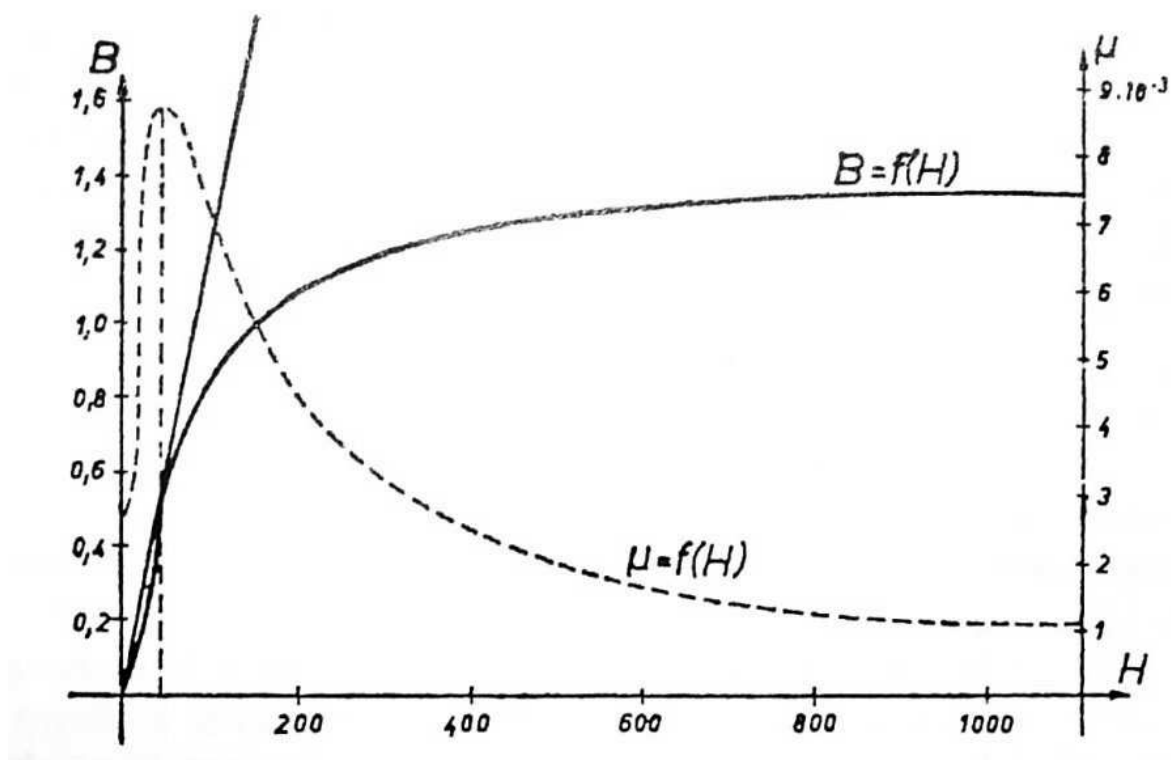
Jsou to látky technicky velmi významné. Magnetizace pozorované u feromagnetických látek jsou mnohem větší než u látek paramagnetických. Vznik výsledného magnetického pole u nich není otázkou magnetického momentu molekul nebo atomů. Feromagnetické látky si lze představit jako složené z magnetických oblastí, které se nazývají domény. Každá doména se magnetuje podél krystalograficky význačných směrů. Domény jsou přitom navzájem odděleny hranicemi, kterým se říká doménové (Blochovy) stěny. Aby se Blochova stěna mohla pohnout, doména na jedné straně se musí zvětšit a doména na druhé straně se smrští. U nezmagnetovaných feromagnetických látek jsou domény nepravidelně uspořádány tak, že se jejich magnetické účinky ruší.

Ve vnějším magnetickém poli se jako celek skokem natácejí do směru intenzity magnetického pole H ty oblasti, jejichž momenty jsou tomuto směru blízké. Při dalším zvyšování intenzity tohoto pole se postupně natočí všechny oblasti (i opačně orientované) a dochází k tzv. magnetickému nasycení, charakterizovanému indukcí nasycení B_s .

Charakteristickým znakem feromagnetických látek je nelineární závislost mezi intenzitou magnetického pole H a magnetickou indukcí B . Tato závislost je označována jako magnetizační křivka. Na obr. 2.3 je vyznačena plnou čarou $B = f(H)$. Křivka prvotní magnetizace odpovídá této závislosti za předpokladu, že se intenzita pole zvyšuje ze stavu dokonalého odmagnetování.

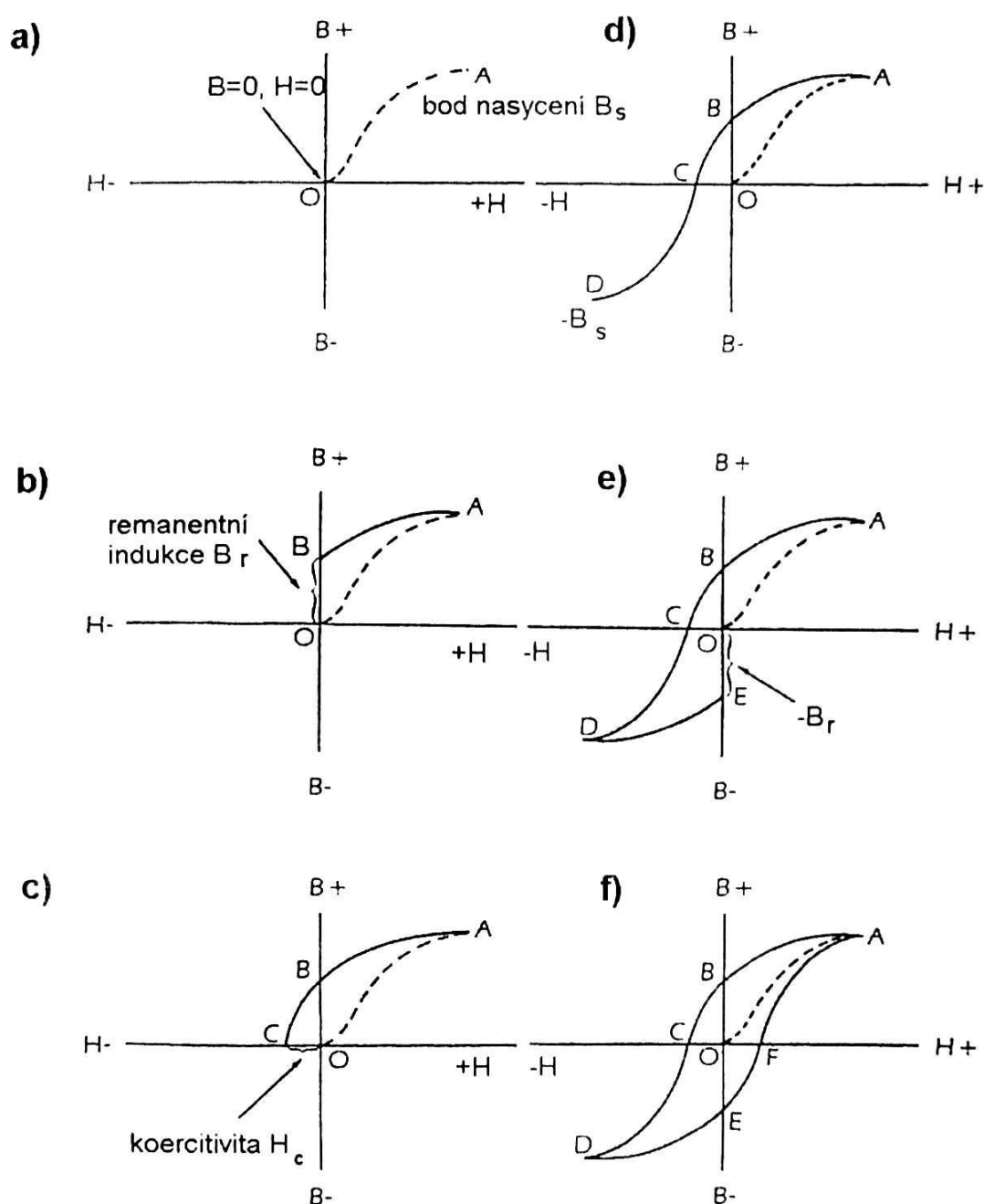
Křivka permeability je grafické vyjádření permeability jako funkce intenzity pole (obr. 2.3 - vyznačená čárkovaně). Začíná bodem počáteční permeability, v dalším průběhu dosahuje lokálního maxima μ_{max} a potom se v klesající části asymptoticky blíží hodnotám μ odpovídajícím neferomagnetické látce. Z toho plyne, že pro účely magnetické defektoskopie má prvořadý význam permeabilita maximální. Při intenzitě pole, odpovídající maximální permeabilitě, je totiž dosaženo největšího možného rozdílu mezi permeabilitou materiálu a permeabilitou okolního vzduchu.

Paramagnetické a diamagnetické látky mají relativní permeabilitu blízkou jedné (např. paramagnetická platina má $\mu_r = 1,000264$, diamagnetická měď má $\mu_r = 0,999990$), u feromagnetik dosahují hodnoty μ_r řádově stovek, tisíců a u některých speciálních materiálů např. u permaloye až statisíců.



Obr. 2.3 Magnetizační křivka feromagnetické látky [6]

Nelineární průběh magnetizační křivky není jediným projevem magnetických vlastností feromagnetických materiálů. Při cyklickém přemagnetování se objevuje také hystereze, což znamená, že při změnách intenzity pole od $+H_m$ do $-H_m$ je jiná hodnota indukce B než při změnách od $-H_m$ do $+H_m$ (magnetické domény se uspořádají dle indukčních čar a po odstranění či zmenšování externího pole zůstanou směrově orientované). Na obr. 2.4 je rozloženě vykreslen průběh celého přemagnetovacího cyklu.



Obr. 2.4 Vznik hysterezní křivky feromagnetických materiálů [6]

2.2 Defektoskopie [5]

Nedestruktivní defektoskopie je diagnostická metoda, která tvoří nedílnou část kontroly jakosti výrobku jak v předvýrobní a výrobní etapě tak v provozu. Bez defektoskopie by nebyla zajištěna bezporuchovost, spolehlivost a bezpečnost v letectví, jaderné energetice, v chemickém průmyslu, ale i např. mostů, přehrad nebo lyžařských lanovek apod. Obecně se nedestruktivní defektoskopie zabývá testováním struktury kovových i nekovových materiálů a vnitřních nebo povrchových vad objektů bez zásahu do jejich celistvosti. Za vadu materiálu nebo výrobku se považuje nesprávné chemické složení, vady struktury, odchylky od požadovaných mechanických a fyzikálních vlastností, necelistvosti (trhliny, praskliny), dutiny (bubliny, póry, staženiny, řediny), vměstky (struskovitost, nekovové a kovové vměstky), tvarové vady, koroze, opotřebení aj.

Pro získání správných výsledků defektoskopických měření je však zapotřebí určitá zručnost a teoretická znalost. I když manuální testování obnáší řadu výhod vyplývajících z intuice a zkušenosti kvalifikovaného pracovníka, neleze vyloučit lidské pochybení s možnými nedozírnými následky. Z tohoto důvodu se dnes ve výrobním procesu budují zcela automatizované defektoskopické systémy umožňující jak testovat vybrané výrobní vzorky, tak 100% výrobní kontrolu. Manuální testování ale nelze nahradit např. při revizi letadel, dopravních prostředků apod. Obvykle se manuální metody také používají při podrobnější analýze vyřazených objektů z automatických defektoskopických linek. Cílem defektoskopie není jen vyřazení vadných výrobků, ale také ujištění, že dobré výrobky jsou dle technických podmínek provozuschopné. Existuje řada defektoskopických metod, ale není žádná jednotlivá metoda, která by byla jednoznačně použitelná k pokrytí všech požadavků za všech okolností. Při volbě defektoskopické metody je nutné vycházet z řady faktorů (mechanické a dle použité metody také elektromagnetické vlastnosti testovaného materiálu, rozměry objektu, okolní prostředí, umístění objektu z hlediska přístupnosti aj.). Současným trendem defektoskopických metod je kromě zjištění vady také stanovení typu a rozměrů této vady a její lokalizace v objektu. V případě zjištění vady je nutné rozhodnout o její závažnosti z hlediska

předpokládaného použití výrobku. Pokud výrobní proces připustí maximální velikost vady a četnost jejího výskytu, znamená to zvýšené nároky na závěry z defektoskopického testu. Jde o to, zda bude takový díl označen jako neshodný, opraven, nebo z hlediska jeho ceny ponechán pro provoz se sníženými provozními parametry.

2.2.1 Základní defektoskopické metody

Vizuální metody (VT)

Zjištění vad výrobků se při vizuální kontrole provádí buď posouzením pouhým zrakem, bez pomůcek případně s pomůckami (lupy, etalony povrchu, endoskopy), to se nazývá přímá vizuální kontrola. Nebo pomocí přístrojů (videoskopy, foto nebo video kamery), to je nazýváno nepřímá vizuální kontrola a používá se v případech, kdy je kontrolovaný povrch nepřístupný nebo z důvodu bezpečnosti. V každém případě musí být povrch dostatečně osvětlen. [6]

Výhody: Nežádoucí změny jako např. vady materiálu, tvarové odchylky a odchylky rozměrů, kvalitativní úroveň jakosti povrchu apod. jsou při vizuálním zkoušení vyhodnocovány přímo a okamžitě, materiálově neomezené možnosti použití, možno využít přenosné vybavení, bez přípravy objektu, minimální zaškolení.

Nevýhody: Lze vyhodnotit pouze povrchové defekty, je nutné osvětlení a přístup k objektu alespoň pro přístroje.

Kapilární metody (PT)

Kapilární metody jsou založeny na využití charakteristických vlastností fázových rozhraní a jevů, označovaných jako kapilární jevy nebo kapilární vlastnosti kapalin. Vlastní princip spočívá ve využití vzlínivosti a smáčivosti vhodných kapalin, jejich barevnosti nebo fluorescence. Těmito kapalinami se pokrývá zkoušený předmět tak, aby mohly vnikat do nečelistvostí vycházejících na povrch. Po očištění povrchu vzlínají zbytky kapaliny zbylé ve

vadách na povrch a za pomoci kontrastní vývojky vytváří barevnou nebo fluoreskující indikaci vady. Indikace vad se hodnotí vizuálně. [6]

Výhody: Použitelnost prakticky pro všechny nesavé materiály bez povrchového pokrytí a čisté. Metoda je citlivá na velmi malé necelistvosti, požadavek minimální zkušenosti, přenosné vybavení. Hlavní výhoda spočívá v principiální i aplikační jednoduchosti a univerzálnosti.

Nevýhody: Lze vyhodnotit pouze povrchové otevřené necelistvosti, nutná předcházející příprava objektu. Rychlost metody do 30 minut, unavující vizuální hodnocení.

Magnetická metoda prášková (MT) – též metoda rozptylových toků

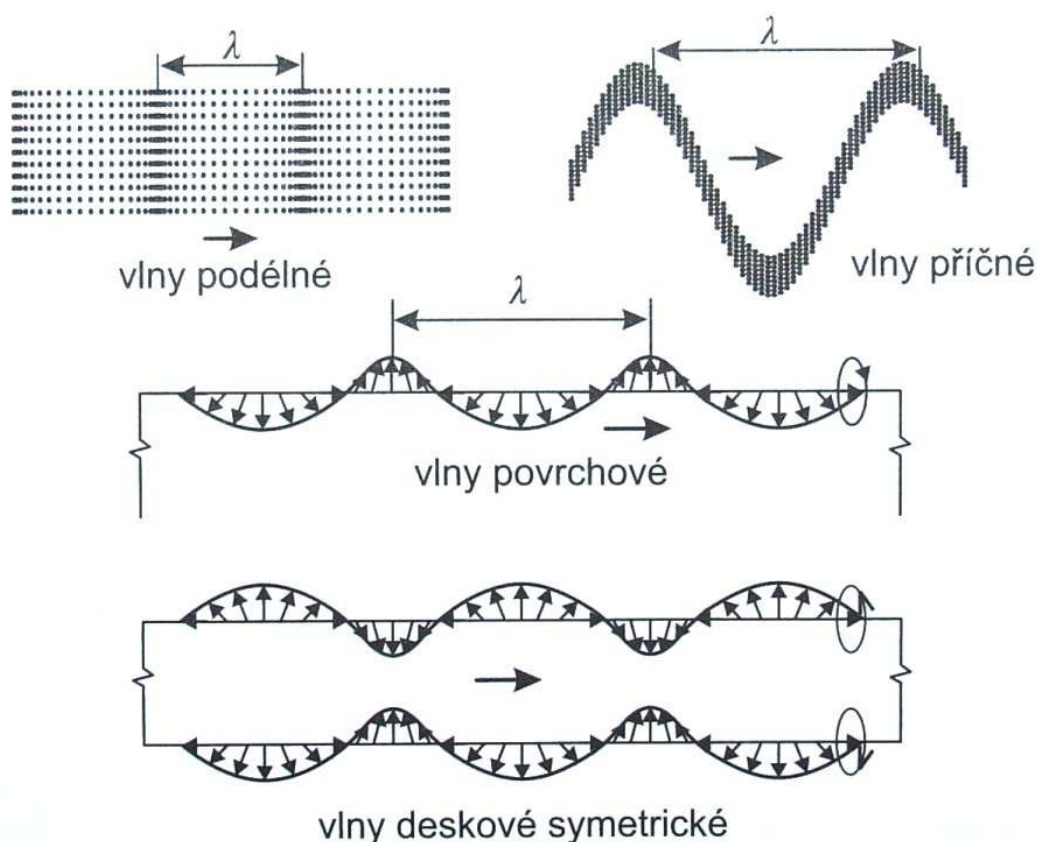
Metody magnetické defektoskopie jsou založeny na zviditelnění nebo změření rozptylového magnetického pole nad povrchovou nebo těsně podpovrchovou trhlinou nebo magneticky nevodivou nehomogenitou ve feromagnetických materiálech (feritických oceli, železa, niklu, kobaltu). [2] V místě výskytu vady dochází ke zhuštění a zakřivení siločar magnetického pole, zvyšuje se magnetický odpor. Část siločar vystupujících na povrch způsobí vznik rozptylového magnetického toku, jenž vytvoří na obvodu vady magnetické póly. Maximální rozptyl magnetického toku nastává na povrchu předmětu. Směrem od povrchu k jádru výrazně klesá. Rozptyl je obecně dán velikostí, tvarem, umístěním defektu, způsobem zmagnetování, volbou magnetovacího proudu a orientací magnetického toku vůči defektu. K indikaci míst rozptylového magnetického toku se používá suchého feromagnetického prášku, nebo detekční kapaliny, v níž je prášek rozptýlen. V místech vystupujícího rozptylového toku se feromagnetické částičky zachytí a tím je zviditelněna vada. Zkoušený předmět je nutno předem zmagnetovat tak, aby byly indukční siločáry orientovány kolmo na směr vady. [3]

Výhody: Metoda je citlivá na malé necelistvosti, zařízení může být přenosné, v porovnání s kapilárními metodami jde o metodu relativně rychlou, požadavek minimální zkušenosti, nízká pořizovací cena, možnost využití v automatických linkách.

Nevýhody: Omezení na povrchové a těsně podpovrchové defekty, omezení pouze na feromagnetické materiály s hodnotou relativní permeability $\mu_r > 100$ a tedy nepoužitelnost pro nerez ocel, měď, hliník, titan, citlivost je závislá na orientaci magnetického pole vůči necelistvosti, povrch objektu nesmí být hrubý, objekt musí být přístupný, je nutná předcházející příprava objektu, je nutná demagnetizace po testu.

Ultrazvukové metody (UT)

Ultrazvuk je mechanické vlnění o frekvenci nad 20 kHz šířící se hmotným prostředím. Ke zkoušení se užívají frekvence v rozmezí 1-10 MHz. Ultrazvukové vlny jsou buzeny piezoelektrickými nebo elektrostričními destičkami a využívají se vlny podélné i příčné. Podélní vlny se mohou šířit v prostředí pevném, kapalném i plynném, naproti tomu vlny příčné se mohou šířit pouze v prostředí pevném a to rychlostí asi poloviční ve srovnání s podélnými vlnami. Rychlost podélných ultrazvukových vln v oceli činí kolem $5900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. [3]



Obr. 2.5 Druhy ultrazvukových vln [5]

Podmínkou zjistitelnosti vady je dostatečný odraz nebo útlum ultrazvukových vln zapříčiněný vadou. V materiálu je zjistitelná vada, jejíž kolmý rozměr na směr šíření vln je větší než polovina délky vlny. Lze zjistit plošné a objemové vady. [3]

V podstatě existují dvě metody zjišťování defektů materiálu ultrazvukem. Metoda průchodová a odrazová.

Průchodová metoda je založena na zeslabení ultrazvuku při průchodu místem s vadou. Vyžaduje dvě sondy umístěné naproti sobě tak, že jedna plní funkci vysílače vlnění a druhá zastává místo přijímače. Metoda neumožňuje přesnou lokalizaci vady.

Odrazová metoda je založena na zaznamenání a vyhodnocení odrazů (ech) od vad uvnitř materiálu. Zpravidla se používá jedna sonda jak k vysílání, tak k příjmu vlnění. Na zkoušení proto postačuje jeden přístupný povrch.

Výhody: Velká citlivost na necelistvosti uvnitř objektu, lze testovat většinu materiálů, okamžité výsledky testu, minimální příprava objektu.

Nevýhody: Povrch objektu musí být přístupný a hladký pro umístění sondy, při použití kontaktních metod je nutné vazební prostředí mezi sondou a objektem, citlivost metody závisí na orientaci akustického paprsku vůči orientaci necelistvosti, metoda není vhodná pro indikaci povrchových a podpovrchových vad, je požadována velká zkušenost pro nastavení zařízení a vyhodnocení výsledků.

Infračervená defektoskopie (termografie)

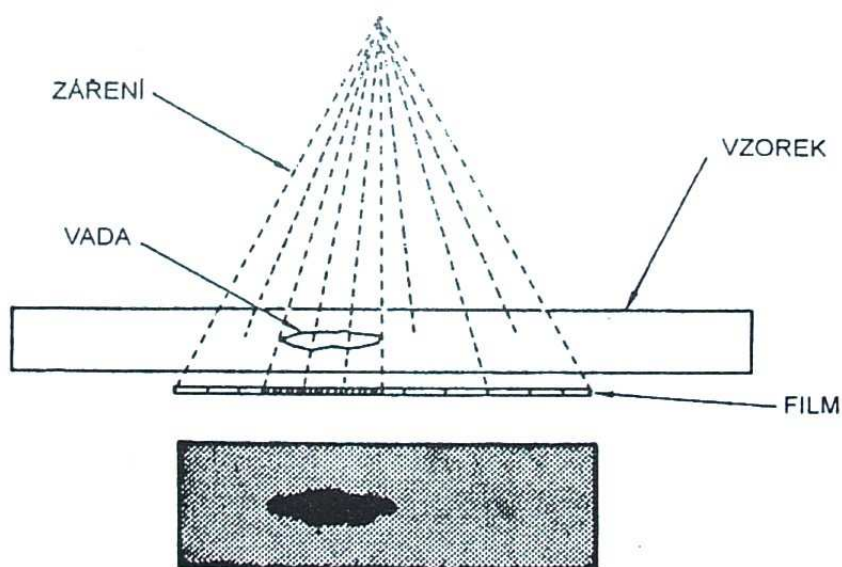
Fyzikálním základem bezdotykové termografie je měření teploty povrchu těles termografickou kamerou (termovizí) a to na základě infračerveného spektra elektromagnetického záření, vyzařovaného povrchem tělesa v oblasti vlnových délek od 0,4 μm do 25 μm . Na termografu lze zjistit opotřebení mechanického prvku (např. ložisko) vlivem tření, v elektrických zařízeních lze diagnostikovat nepřipustný ohřev ztrátovým výkonem způsobený elektrickým proudem (např. na spojovacích cívkách kontaktů, izolátorech vysokého napětí, vinutích elektromotorů).

Výhody: použitelnost pro většinu materiálů včetně kompozitů, citlivost na velmi malé změny teploty, aplikace jak pro malé tak velké plochy povrchu tělesa, možnost průběžného záznamu signálu.

Nevýhody: metoda není efektivní pro trhliny v tenkém materiálu, k vyhodnocení vad je nutná zkušenost.

Defektoskopie prozařováním (RT) – též radiografické metody

Zkoušky prozařováním jsou založeny na vyhodnocování závislosti absorpce (koeficientu záření) rentgenového, gama nebo částicového (elektrony, neutrony, částice alfa) záření v důsledku přítomnosti případných povrchových nebo vnitřních necelistvostí v testovaném materiálu.



Obr. 2.6 Princip prozařování [6]

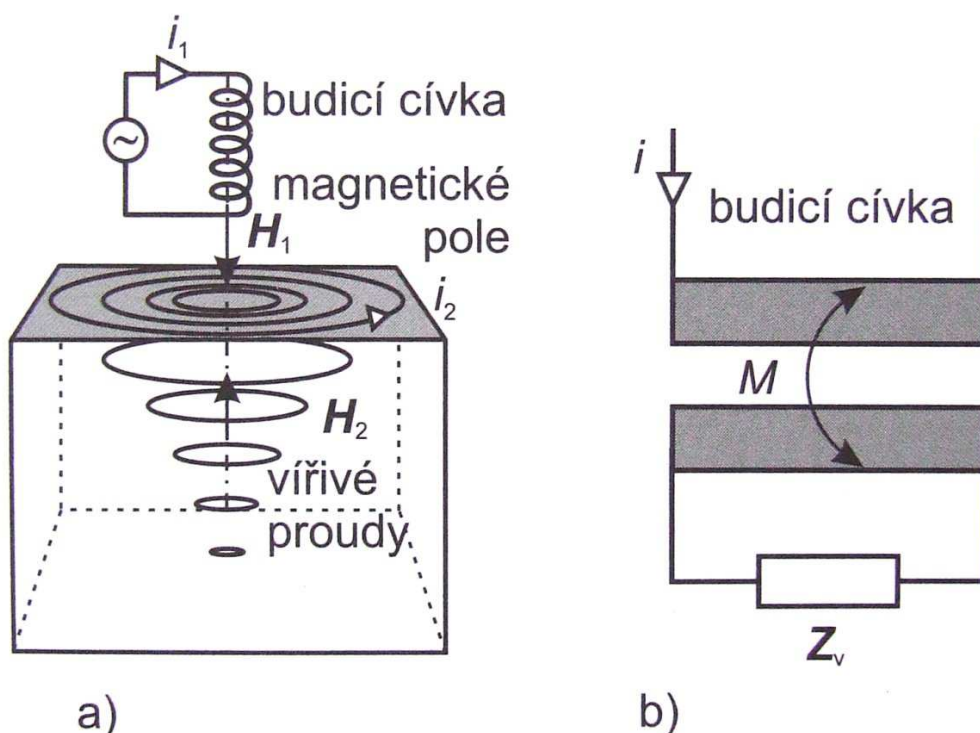
Výhody: použitelnost pro většinu materiálů včetně kompozitů nezávisle na jejich tvaru a povrchu.

Nevýhody: omezení tloušťky dle hustoty materiálu, kritická vzájemná orientace rovinné necelistvosti a paprsku záření, nebezpečné radiační prostředí, požadavek značné zkušenosti při interpretaci vyhodnocení vady, nemožnost lokalizace hloubky vady.

Elektromagnetická defektoskopie vířivými proudy (ET)

Na rozdíl od magnetických metod vyhodnocujících rozptylová pole je u metody vířivých proudů zkoušené těleso vystaveno působení střídavého magnetického pole, vytvořeného budicí cívkou, napájenou střídavým proudem.

Vlastní vyhodnocení se děje prostřednictvím napětí, které je výsledným polem indukováno a to buď přímo v cívce, která budí magnetické pole (cívkový systém má jen jedno vinutí a měří se impedance tohoto vinutí co do velikosti a fáze. Způsob příložné cívky) nebo v druhé cívce měřicí (cívkový systém má dvě vinutí, budicí a měřicí a zjišťuje se amplituda a fáze napětí na měřicím vinutí. Způsob průchozí cívky). Hustota vířivých proudů se mění vlivem necelistvosti v materiálu.



Obr. 2.7 Vířivé proudy: a) princip, b) náhradní transformátorové schéma [5]

Způsob průchozí cívky [7]

Systém má dvě vinutí. Obě vinutí jsou většinou navinuta na trubkovém nosiči z plastu a zkoušený předmět tvoří jádro cívky. Pracovní průměr cívky je vhodné volit tak, aby zkoušený předmět cívku téměř vyplňoval a činitel zaplnění byl co největší.

Snímače mohou být uspořádány odděleně, nebo jsou oba systémy spojeny v jeden celek. V prvním případě jedním snímačem procházejí kontrolované výrobky, zatímco ve druhém je vložen etalonový výrobek, jehož vlastnosti byly ověřeny jinými metodami. V druhém případě se porovnávají dvě sousední oblasti téhož výrobku při jeho průchodu snímačem. Při shodě fyzikálních vlastností obou výrobků, nebo obou porovnávaných oblastí, jsou shodná i obě napětí indukovaná v měřicích vinutích snímačů a rozdílové napětí je nulové. V opačném případě vzniká rozdílové napětí, z jehož amplitudy a fáze lze soudit na velikost a druh odchylky, která napětí vyvolala.

Způsob příložné cívky [7]

Cívka se přikládá k radiálně k povrchu zkoušeného předmětu, takže osa střídavého magnetického pole buzeného cívkou je kolmá ke zkoušenému povrchu. Tento způsob se využívá především u rozměrnějších výrobků, kde citlivost průchozí cívky již nevyhovuje, a pro lokální indikaci necelistvostí v povrchových vrstvách zkoušených předmětů. Účinek vířivých proudů je značně závislý na oddálení cívky od povrchu předmětu a tloušťce předmětu. Tento oddalovací efekt je možno využít také např. k měření tloušťky nevodivé vrstvy na vodivém základu. Při zjišťování necelistvostí materiálu nebo vodivosti je naopak nutno oddalovací efekt potlačovat.

Metody se využívají k detekci materiálových diskontinuit (povrchových prasklin, trhlin, poruch svarů), měření tloušťky stěn, tloušťky laků, ke kontrole strukturních stavů při tepelném zpracování, povrchových vrstev kovů, aj. [6]

Výhody: Rychlá, citlivá a relativně levná bezdotyková metoda zkoušení, možnost využití v automatických linkách, jedna z mála metod umožňující měření při vysokých teplotách (kontrola za tepla válcovaných materiálů).

Nevýhody: Použitelnost jen pro elektricky vodivé materiály, omezení frekvenčně závislou hloubkou vniku elektromagnetického pole, povrch objektu musí být přístupný pro umístění sondy a hladký, je požadována značná zkušenost obsluhy, velká časová náročnost při manuálním použití, značná citlivost na rozměry součástí, okrajový efekt.

Akustická emise (AE)

Akustickou emisí se nazývají elastické napěťové vlny vznikající dynamickým uvolněním mechanického napětí uvnitř materiálu tělesa nebo procesem působícím vznik elastických napěťových vln na povrchu tělesa. Metoda zahrnuje detekci akustické emise, která se na povrchu objektu snímá piezoelektrickými senzory, následné elektronické zpracování detekovaného signálu a určení a vyhodnocení zdrojů akustické emise a jejích parametrů. Nejedná se pouze o detekci AE vyvolané plastickou deformací kovů, ale též o monitorování a identifikaci celé řady jiných procesů, jako porušování materiálů konstrukcí, netěsností a úniků medií pod tlakem, tření, obrábění, sváření, výrobních a technologických procesů atd. Metoda detekuje a charakterizuje aktivitu porušení a defektů právě a pouze v jejich průběhu. [6]

Výhody: Možnost monitorování velké plochy z hlediska rozrušování struktury a predikce závažných defektů.

Nevýhody: Senzor nebo zvukovod k senzoru je v kontaktu s povrchem tělesa, zpravidla je zapotřebí umístit současně více senzorů, pro vyhodnocení je nutné zpracování změřených signálů.

Hledání netěsností (LT)

Netěsnost je vada materiálu nebo montáže umožňující průnik tekutiny. Může to být jednotlivá vada, ale také plošný shluk milionů mikrokominikací. Vymezení velikosti průniků je na jedné straně dáno permeací (přirozený průnik plynné fáze fází pevnou) a na druhé straně se obor nezabývá velkými netěsnostmi, jejichž projevy jsou nezaměnitelně patrné (trhliny, praskliny a defekty, jimiž tekutina uniká s nepřehlédnutelnou intenzitou). [6]

K zjišťování netěsností se používají metody:

- bublinkové
- měření změn tlaku
- měření a hledání netěsností pomocí zkušebního plynu
- penetrační
- akustické

2.3 Strukturoskopie

Strukturoskopie se zabývá zkoumáním struktury z hlediska fázové analýzy a krystalické stavby kovů a jejich slitin. Zahrnuje také strukturometrii, která slouží ke zjišťování chemického složení materiálu. [3]

Lze ji rozčlenit na následující metody:

- Akustické metody zkoušení
- Metody vířivých proudů
- Magnetické a elektromagnetické metody

2.3.1 Akustické metody zkoušení [8]

Protože struktura a chemické složení materiálu má značný vliv na některé vlastnosti ultrazvuku při jeho průchodu danou látkou, využívá se změn těchto vlastností k posuzování stavu struktury, popřípadě chemického složení.

Akustické vlastnosti

Akustické vlastnosti materiálu popisují rychlosti šíření pružného příčného nebo podélného kmitání atomů (molekul) kolem rovnovážné polohy a jeho útlum. Rychlost šíření akustické vlny zvuku je závislá na modulu pružnosti, měrné hmotnosti a Poissonovu číslu.

Prostupnost akustických vln materiálem klesá s útlumem hmoty matrice a zejména s množstvím a velikostí vnitřních nespojitostí. Čím více je v materiálu nespojitostí, tím větší je množství a velikost odrazu tlaku akustické vlny z rozhraní zpět. Například rozhraní matrice - grafit v litině odrazí 80,5 % tlaku akustické vlny. Přímé šíření akustické vlny litinou je po několika odrazech od útvarů grafitu vyčerpáno a rozptýleno. Velikost dráhy akustické vlny maticí závisí na labyrintu grafitických útvarů. Čím více útvary maticí oslabují, tím větší je hodnota akustické dráhy Lu ve srovnání s přímou dráhou L . Rychlost zvuku c_L tak klesá.

$$c_L = c_{L0} * \frac{L}{Lu} \quad [m*s^{-1}] \quad (11)$$

Kde je:

c_{L0} ... rychlost zvuku ocelové matrice = 5920 m*s^{-1}

Pokud dochází v rychleji ochlazované části odlitku k metastabilní krystalizaci eutektika (vylučuje se ledeburit) existuje v šíření akustické vlny odlitkem méně překážek a tudíž hodnota rychlosti zvuku s rostoucím množstvím ledeburitu ve struktuře roste.

Metody zkoušení

Pokud se odlitek testuje kmity generovanými vlastními sondami do lokálních průřezů stěn, hovoří se o ultrazvukovém zkoušení a pokud se hodnotí frekvence a útlum vlastních kmitů vybuzeného odlitku, jde o akustické rezonanční zkoušení. Oba způsoby zkoušení využívají interakce struktury s externě buzeným akustickým vlněním. Tím se liší od metody akustické emise pracující s pasivními snímači vln, které generuje sama struktura z míst mezního namáhání.

Při ultrazvukové impulzní metodě bývá zdrojem a zároveň detektorem ultrazvukových vln obvykle sonda s kruhovým nebo obdélníkovým piezoměničem elektrické energie na mechanickou. Ultrazvuková energie se do stěny odlitku vyzařuje formou krátkých opakovaných impulzů (opakovací frekvence řádově v kHz) nosné vlny s frekvencí jednotek MHz. Konkrétní hodnota použité nosné frekvence tvoří kompromis mezi přesností (ta roste s výškou frekvence) měření a prozařitelností stěny odlitku. Pro litiny s lupínkovým grafitem se používá maximálně 2 MHz. Vyslaný impulz se odrazí od protějšího povrchu stěny nebo rozhraní a jeho odraz sonda opět přijme. Po elektronickém zpracování se zobrazí jako odrazová echa na displeji nebo obrazovce defektoskopu nebo číselným odečtem hodnoty rozteče ech na displeji tloušťkoměru. K přenosu ultrazvukového vlnění mezi čelem sondy a povrchem odlitku musí být navázána tzv. akustická vazba kontaktním kapalným médiem (voda, vazelína).

Zkoušení se týká prozvučovaného sloupce litiny, který odpovídá průměru sondy a rozevření svazku vysílaných vln. Pro získání hodnot L a Lu nutných k stanovení podélné rychlosti zvuku c_L podle (11) je nutno provést měření posuvným měřítkem a ultrazvukem. Specializované přístroje měří současně posuvným měřítkem a sondou umístěnou v čelisti měřítka.

Měření rychlosti povrchových vln dvěma sondami s konstantní roztečí L na jedné straně odlitku může podstatně zvětšit produktivitu zkoušení.

Hodnocena je však jen povrchová partie odlitku ovlivněná licí kúrou (způsob zkoušení vhodný jen pro obrobené plochy odlitků). Reflektor povrchových vln tvoří hrana odlitku. Toho lze využít k měření rychlosti povrchových vln jen jednou sondou.

Rezonanční zkoušení spočívá ve vyvolání (generátorem s proměnným kmitočtem nebo úderem) a měření parametrů vlastních kmitů, které reprezentují celý objem odlitku. Takto lze zkoušet pouze „znějící“ štíhlé tvary. Odlitky musí být geometricky stejné v hmotnostní toleranci do 3 %.

Měření tvrdosti materiálu ultrazvukem je založené na změně vlastní frekvence tyčky, která je zakončena diamantovým hrotem a přitlačována konstantním tlakem na měřený materiál. Vlastní frekvence je tím větší, čím větší je styková plocha s měřeným materiálem.

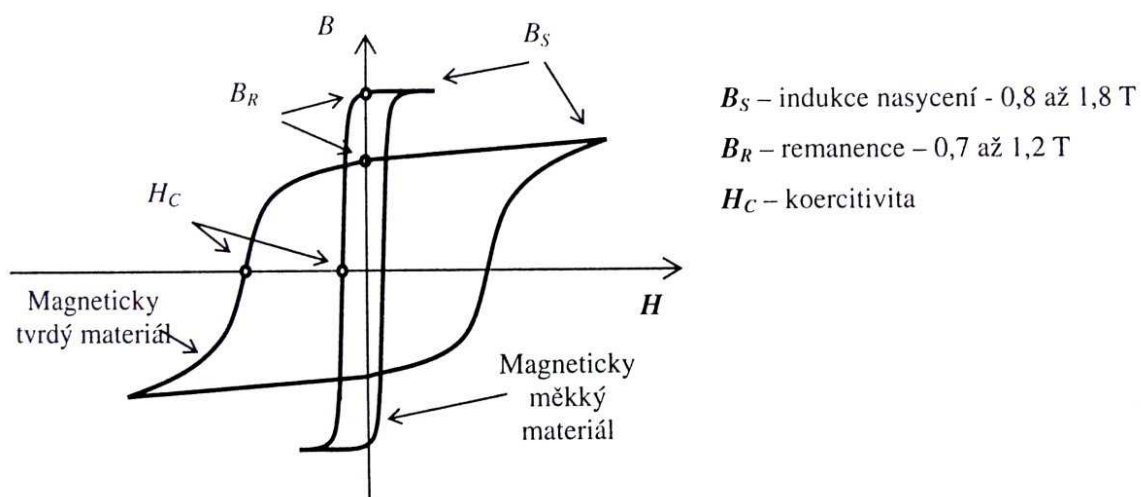
2.3.2 Metody vířivých proudů

Metoda vířivých proudů se používá také ve strukturoskopii. Umožňuje zkoumat ty vlastnosti materiálu, jejichž změna ovlivňuje elektrickou vodivost, popřípadě permeabilitu předmětu, neboť hustotu vířivých proudů ovlivňuje také struktura materiálu. Principy a způsoby zkoušení jsou popsány v předcházející kapitole o defektoskopii.

2.3.3 Magnetické a elektromagnetické metody [6]

Magnetické strukturoskopické metody jsou založeny na využití souvislosti mezi magnetickými vlastnostmi a strukturně mechanickým stavem materiálu. Zpravidla není problém provádět taková zkoumání v laboratorních podmínkách, ale použití těchto metod na součásti používané v provozu bývá problematické. V řadě případů lze použít pro kontrolu tepelného zpracování, chemického složení, mechanického pnutí, hloubky povrchové vrstvy (např. vrstvy oduhličení, prokalení, nitridace apod.) nepřímý postup a to měření vybraného magnetického parametru hysterezní smyčky, který koresponduje se sledovanou vlastností kontrolované součásti.

Na *obr. 2.8* jsou zobrazené hysterezní křivky reprezentující materiál, jenž je v elektrotechnice označován jako magneticky tvrdý, nebo magneticky měkký. Tento obrázek může také dobře reprezentovat strukturní stav výrobku tepelně zpracovaného např. kalením (širší křivka) a popouštěním (užší křivka).



Obr. 2.8 Hysterezní křivky materiálu magneticky tvrdého a magneticky měkkého [6]

Experimentálně je ověřeno, že hysterezní smyčka s jejími charakteristickými parametry tj. koercitivní silou H_C , remanentní indukci B_R , indukci nasycení B_S , měrnými ztrátami P_h , úměrnými ploše hysterezní křivky, často velmi citlivě reaguje na některou mechanickou vlastnost, např. tvrdost nebo pevnost materiálu, rozlišitelností větší než se dosahuje klasickými mechanickými zkouškami. Hysterezní smyčka v sobě promítá chování magnetických domén při magnetování.

U mikrostruktury oceli se koercitivní síla i hysterezní ztráta zvyšují a permeabilita se snižuje se zvyšujícím se obsahem uhlíku. Tyto účinky se přičítají zvýšenému vyplnění Blochových stěn v doménové struktuře částicemi karbidu. Přítomnost neferomagnetických fází také ovlivňuje magnetickou reakci. Vzorkům s lamelárním perlitom náleží vyšší koercitivní síla než vzorkům s karbidy z malých kuliček. Destičky (lamely perlitu) více brzdí pohyb Blochovy stěny domén, než kuličky. [2]

V eutektoidní oceli perlitická mikrostruktura má nejmenší koercitivní síly, nejmenší hysterezní ztráty a největší počáteční diferenciální permeabilitu. Martenzit má největší koercitivní síly, největší hysterezní ztráty a nejmenší počáteční diferenciální permeabilitu. Bainitické skupině struktur přísluší střední hodnoty pro všechny tři parametry. Koercitivní síla se zvětšuje s druhou odmocninou hustoty překážek pohybu Blochovy stěny typu dislokací.

Tento vztah se však neukázal jako univerzální, neboť jeho jednoduchost nebere v úvahu strukturu a rozdělení dislokací. [2]

Účinky namáhání (mechanických napětí) na feromagnetické materiály jsou složité, neboť je zde několik faktorů, které je nutno brát v úvahu. Například, je třeba vědět, zda namáhání je v rámci elastického rozsahu materiálu, nebo zda překročilo tento limit a trvale deformuje materiál. Také se musí uvážit, zda materiál má pozitivní nebo negativní magnetostrikci. Rovněž je důležitý směr namáhání s ohledem na doménu, spolu s možností násobků namáhání působících současně. Materiál s pozitivní magnetostrikcí nabývá na délce podél směru magnetizace. Naopak délka materiálu s negativní magnetostrikcí se sníží ve směru magnetizace. Magnetostrikce silně ovlivňuje reakci feromagnetického materiálu na namáhání. Namáhání v tahu, aplikované na materiál s pozitivní magnetostrikcí může zvýšit magnetickou indukci. Namáhání (napětí) tvoří účinné magnetické pole, působící ve spojitosti s jakýmkoli použitým magnetickým polem. Většina železných slitin má smíšenou magnetostrikci v závislosti na použitém magnetickém poli a napětí. Při záporných napětích má železo pozitivní magnetostrikci až do intenzity magnetického pole asi $20 \text{ kA} \cdot \text{m}^{-1}$. Při namáhání tahem má negativní magnetostrikci. Bod, ve kterém železo přechází z pozitivní na negativní magnetostrikci, se nazývá Villariho zvrát. Tento bod se mění s napětím a složením materiálu. Pro uvážení účinku namáhání na magnetizaci materiálů je potřebné lépe rozumět Blochovým stěnám a struktuře domény. Blochova stěna, kde magnetické momenty mění svou orientaci, je rozprostřena přes několik set atomových vrstev. Tloušťkou Blochovy stěny je pak myšlený počet vrstev zapojených do změny orientace. [2]

Barkhausenův jev je přerušovaná změna v magnetizaci tak, jak se mění magnetické pole. Typická hysterezní smyčka vypadá nejprve hladká, ale při plném rozlišení je ve skutečnosti tvořena z přírůstkových změn (nazývaných "skoky") v magnetické indukci. Změny odpovídají především nevratnému pohybu Blochových stěn. Měření podle Barkhausena zkoumají pouze účinky blízko povrchu, typicky do hloubky 0,1 mm. Popisují odhalení pružné a trvalé deformace, určování velikosti zrna a únavu. Měří se magnetoelastický parametr (ekvivalent efektivní hodnoty napětí signálu Barkhausena). [2]

Informaci o hysterezní smyčce a jejích parametrech lze získat buď přímým způsobem tj. jejím přímým měřením, nebo jejím nepřímým projevem na indukovaném napětí v měřicí cívce snímací jednotky.

V prvním případě se při kontrole používá stejnosměrné nebo pomalu se měnící excitační magnetické pole. Tyto metody se označují jako magnetické strukturoskopické metody.

V druhém případě se používá střídavý magnetizační proud, magnetické pole je časově proměnné s kmitočtem v jednotkách až stovkách Hz (do 1 kHz). Tyto metody se označují jako elektromagnetické, neboť využívají princip elektromagnetické indukce, objevený Faradayem. Základ je shodný s metodou vířivých proudů, podobná je i architektura přístrojové zkušební techniky. Zásadní odlišnost proti přístrojům pro kontrolu trhlin je v použitém kmitočtu. Při kontrole makroskopických necelistvostí (trhlin) se používají vyšší kmitočty, řádově desítky kHz až jednotky MHz.

Podmínky použitelnosti magnetických strukturoskopických metod

Úspěšnost magnetických strukturoskopických metod je vázána splněním následujících podmínek:

- vybraná magnetická veličina musí být v jednoznačné relaci se sledovanou fyzikální vlastností
- tvar kontrolovaného objektu nesmí způsobit výrazný pokles informace magnetické veličiny
- navržený princip strukturoskopické kontroly musí být dostatečně operativní s ohledem na množství kontrolovaných výrobků
- lze sledovat pouze feromagnetické kovy

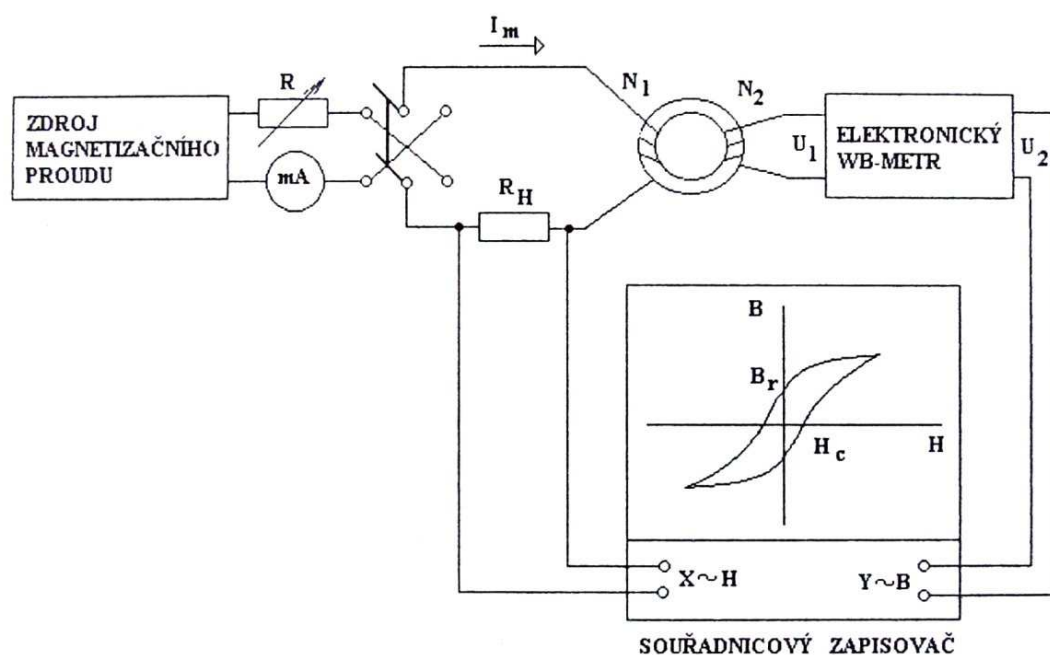
Měření hysterezních křivek feromagnetických materiálů

Pro posouzení žádané relace mezi magnetickými vlastnostmi a kontrolovaným stavem výrobku je někdy nutné změřit magnetizační křivky na připravených vzorcích s definovanými fyzikálními vlastnostmi. Současná přístrojová technika umožňuje záznam hysterezní křivky tj. závislost magnetické indukce B na intenzitě magnetického pole H plynulým přemagnetováním měřeného vzorku v jednom nebo několika magnetovacích cyklech. Používá se nejčastěji integrační metoda měření, tzn., že magnetická

indukce B se určí integrací napětí indukovaného v měřicí cívice, umístěné na vzorku. Intenzita magnetického pole H se odvodí buď z magnetovacího proudu, nebo se měří její tangenciální složka u povrchu vzorku tangenciální Hallovou sondou. Analogový záznam hysterezní smyčky se získá použitím souřadnicového X-Y zapisovače, u něhož se na osu X přivádí napětí úměrné veličině H a na osu Y napětí úměrné veličině B .

Měření na uzavřených vzorcích

K záznamu hysterezní smyčky je potřeba hodnoty B a H kontinuálně měřit. Jestliže bude měřený vzorek ve tvaru prstence, lze jej opatřit magnetizačním vinutím N_1 a měřicím vinutím N_2 . Při pomalých změnách magnetizačního proudu v magnetizačním vinutí se bude v měřicím vinutí indukovat napětí. Aby bylo možno určit magnetickou indukci B , je třeba indukované napětí měřicího vinutí integrovat v integračním zesilovači.



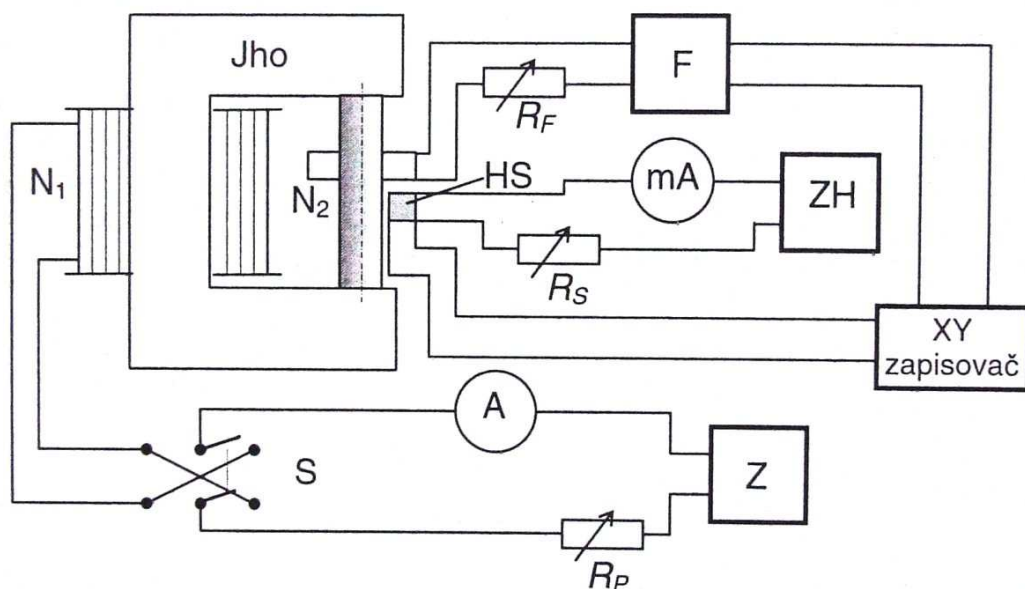
Obr. 2.9 Měření magnetizačních charakteristik na uzavřených vzorcích [6]

Měření na otevřených vzorcích

Otevřené vzorky ve tvaru válečků nebo kostek jsou k dispozici častěji než prstencové vzorky. Pro měření charakteristik je problém správného určení intenzity magnetického pole H . U toroidních vzorků lze intenzitu magnetického

pole odvodit z proudu. U otevřených vzorků to učinit nelze, neboť se při jejich magnetování vytváří ve vnějším okolí vzorku demagnetizační magnetické pole. Proto se pro magnetování takovýchto vzorků používají jha z magneticky měkkého materiálu (*obr. 2.10*).

Magnetické pole je buzeno magnetovacím vinutím N_1 napájeným magnetovacím proudem ze zdroje Z . Intenzita magnetického pole se neodvozuje z magnetovacího proudu vzhledem k tomu, že intenzita H není po celé délce integrační cesty konstantní. Protože jsou tangenciální složky intenzity, tj. složky rovnoběžné s povrchem vzorku, na rozhraní dvou prostředí s různými permeabilitami stejné, je možné určit intenzitu ve vzorku měřením její tangenciální složky těsně nad povrchem vzorku. K tomu se používá tangenciální Hallova sonda HS , napájená ze zdroje ZH . Výstupní napětí z Hallovy sondy je přivedeno na osu X souřadnicového zapisovače. Magnetická indukce se měří stejným způsobem jako v případě měření na uzavřených vzorcích, tj. integrací napětí z měřicí cívky s N_2 závitů pomocí elektronického integrátoru (webermetru) F .



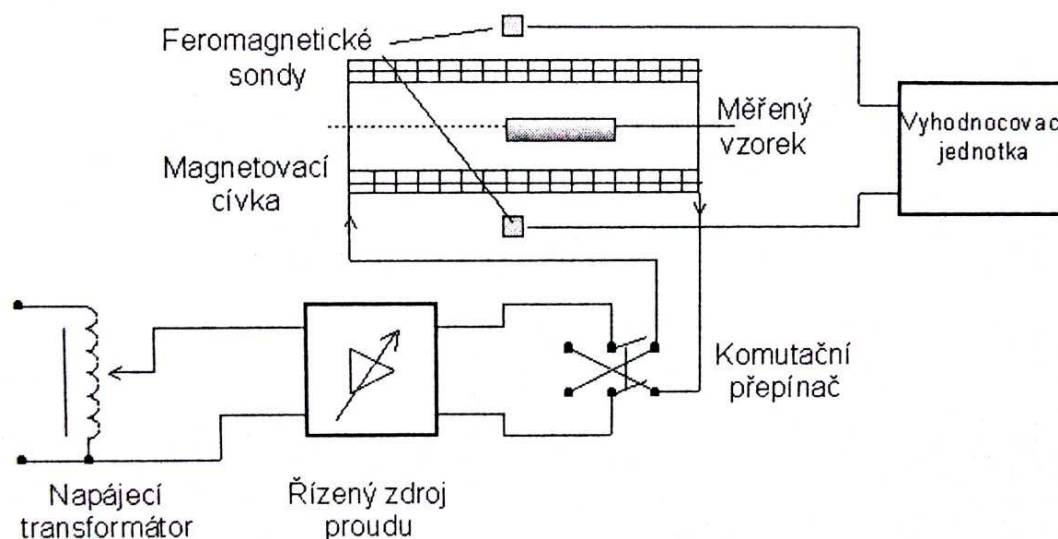
Obr. 2.10 Měření magnetizačních charakteristik na otevřených vzorcích [6]

Současné přístroje pro měření magnetizačních charakteristik označované jako hysterezigrafy jsou při měření řízeny počítačem a proces je digitalizován. Z dat sejmutých během jedné nebo několika period spočítá

počítač průběh magnetické indukce numerickou integrací napětí z měřicí cívky N_2 . Kromě toho jsou spočítány hysteretní ztráty P_h , koercivita H_c , remanentní indukce B_r a je zobrazena hysteretní smyčka. Číslicovým zpracováním je zajištěna podstatně vyšší přesnost ve srovnání s analogovými přístroji. Počítač volí nejvýhodnější měřicí rozsahy vstupních zesilovačů a provádí automatické korekce offsetových chyb.

Měření koercivity

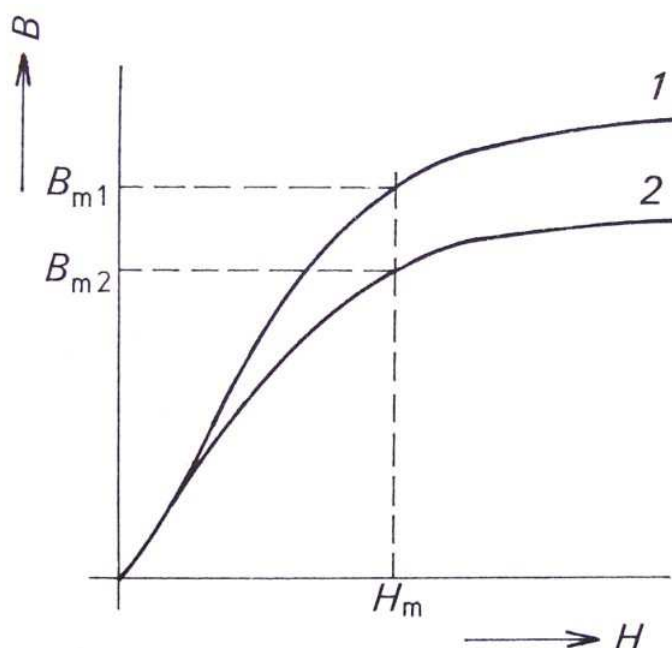
Přímé změření hodnoty koercivity, aniž by bylo nutné měřit celou hysteretní křivku, umožňují přístroje označované jako koercimetry. Blokové schéma koercimetru je na obr. 2.11. Měřený vzorek se vkládá do magnetovací cívky, která je napájena z regulovaného zdroje stejnosměrného proudu. Dvojice feromagnetických sond v diferenciálním uspořádání měří magnetické pole vzorku. Při měření se vzorek nejprve zmagnetuje až do nasycení v jednom směru intenzity magnetického pole (proud se regulovaným zdrojem zvyšuje do maxima a snižuje zpět na nulu), poté se magnetizační proud komutuje a plynulým zvyšováním intenzity magnetického pole v opačném směru se hledá stav, kdy je magnetizace vzorku nulová. Tento stav indikují feromagnetické sondy nulovým výstupním signálem. Hodnota intenzity magnetického pole cívky pak odpovídá koercivitě vzorku. Regulace magnetovacího proudu může být prováděna ručně nebo automaticky řízeným zdrojem proudu.



Obr. 2.11 Blokové schéma koercimetru [6]

Měření permeability [7]

Permeabilita se zpravidla určuje tak, že se měří indukční tok v kontrolovaném výrobku při určité zvolené hodnotě intenzity magnetického pole. Dodrží-li se konstantní intenzita magnetického pole, je pak zjišťovaná hodnota indukčního toku úměrná permeabilitě. Takto se stanoví permeabilita zdánlivá, popř. efektivní, neboť její hodnota je ovlivňována tvarem výrobku a ve střídavých polích také působením vířivých proudů. Přístroje na stanovení permeability se nazývají permeametry.



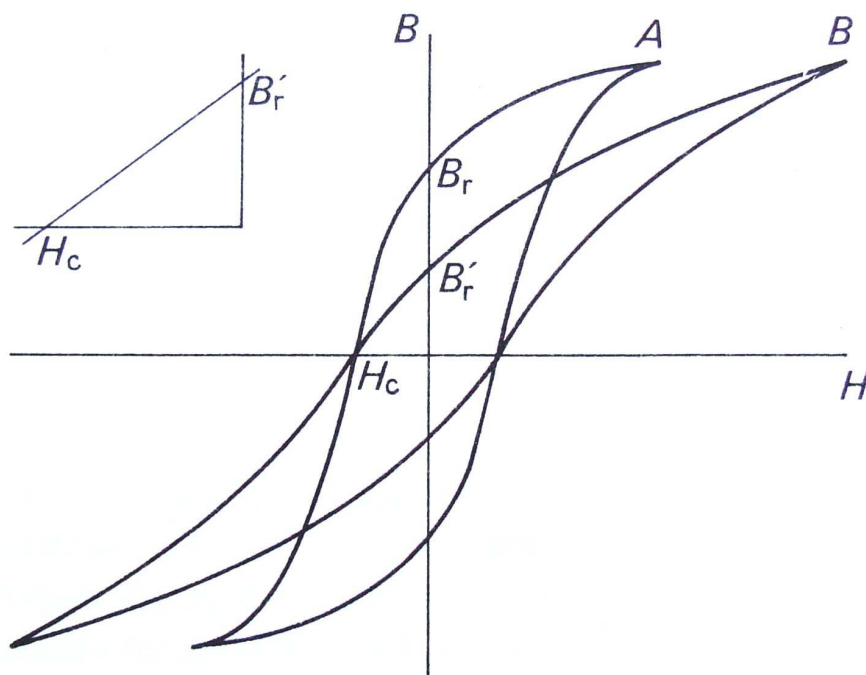
Obr. 2.12 Princip měření permeability při využití střídavých polí. Křivky 1 a 2 jsou magnetizační charakteristiky etalonového a kontrolovaného výrobku. [7]

Při působení magnetického pole H_m vznikne v etalonu indukce B_{m1} a v kontrolovaném výrobku indukce B_{m2} , jimž odpovídají úměrná napětí indukovaná ve snímacích cívkách. Podle typu přístroje se měří buď srovnávacím způsobem, tj. hodnotí se rozdíl obou napětí, nebo se měří každé napětí zvlášť a podle rozdílu výchylek se usuzuje na rozdíl ve struktuře materiálu výrobku.

Měření remanence [7]

Měření remanence je metodou nedestruktivní kontroly tepelného zpracování feromagnetických materiálů. Řada ocelí vykazuje totiž velmi

dobrou závislost mezi tvrdostí a koercivitou, kterou je možno využít ke kontrolním účelům. Měření koercivity však není jednoduché a v provozní praxi se nepoužívá. Lze však z hodnoty zdánlivé remanence usuzovat na koercivitu zkoušeného výrobku, a proto za určitých předpokladů je možno nahradit měření koercivity měřením remanence, které je podstatně jednodušší.



Obr. 2.13 Měření remanence: B_r – zdánlivá remanence, H_c – koercitivní síla [7]

Vychází se z předpokladu, že tělesa, u nichž je poměr délky k průměru blízký jedné, mají vysokou hodnotu demagnetizačního činitele, což vede ke snížení strmosti hysterezní smyčky (obr. 2.13). Smyčka přechází z původního tvaru A příslušného uzavřeného obvodu (např. prstence) na tvar B. Ve druhém kvadrantu souřadného systému tvoří její větve přeponu pravoúhlého trojúhelníka, jehož odvěsnami jsou zdánlivá remanence a koercivita. Je patrné, že se při změně koercivity mění úměrně i hodnota zdánlivé remanence, neboť trojúhelníky ve druhém kvadrantu zůstávají podobné, protože jejich přepony jsou rovnoběžkami. Za těchto podmínek lze na koercivitu usuzovat z hodnoty zdánlivé remanence. Měření remanence lze jednoduše provést měřením pole v okolí zkoušeného předmětu, který byl před tím zmagnetován do nasycení. Kromě toho lze postup snadno mechanizovat a automatizovat.

Magnetování válcové součásti stejnosměrným magnetickým polem

Je-li magnetována kontrolovaná součást (kterou je možno si připodobnit přímým válcovým tělesem) stejnosměrným magnetickým polem, projeví se demagnetizačním působením na toto pole. Při magnetování si součást vytvoří vlastní magnetické pole, které působí vně součásti proti původnímu magnetickému poli, čímž dochází v okolí součásti k jeho zeslabení. Matematicky je tento proces vyjádřen vztahem (12).

$$H_e = H_r + \frac{D_{(0)} * J}{\mu_0} \quad (12)$$

Kde je:

H_e ... intenzita vnějšího magnetického pole

H_r ... intenzita magnetického pole v součásti (středu)

$D_{(0)}$... demagnetizační činitel součásti (středový)

J ... magnetická polarizace ($J = B - \mu_0 * H_z$)

μ_0 ... permeabilita vakua

Demagnetizační činitel $D_{(0)}$ závisí na poměru délky tělesa L k jeho průměru D . Demagnetizačním působením tělesa s volnými konci se mění průběh magnetizační křivky ve srovnání s křivkami pro uzavřený (toroidní) vzorek. Vztah mezi magnetickou indukcí B ve vzorku a intenzitou magnetického pole H , kterou je vzorek magnetován, je u toroidního vzorku vyjádřen již uvedeným vztahem (4). Pro vzorek s otevřenými konci se v převodním vztahu mezi veličinami B a H vyskytuje místo permeability μ_r tzv. efektivní permeabilita tvaru μ_{ef} . Její velikost je ovlivňována demagnetizačním činitelem $D_{(0)}$.

$$\mu_{ef} = \frac{\mu_r}{1 + D_{(0)} * (\mu_r - 1)} \quad (13)$$

Pro nízké hodnoty L/D jsou změny v hodnotách μ_{ef} při změně μ_r o 10 % velmi malé. Například u součástí s poměrem $L/D = 1$ a s relativní permeabilitou $\mu_r = 100$ vyvolá 10% změna μ_r pouze 0,3% změnu μ_{ef} .

Naopak se výrazně projevují změny rozměrů součástí, které mohou být způsobeny výrobními tolerancemi.

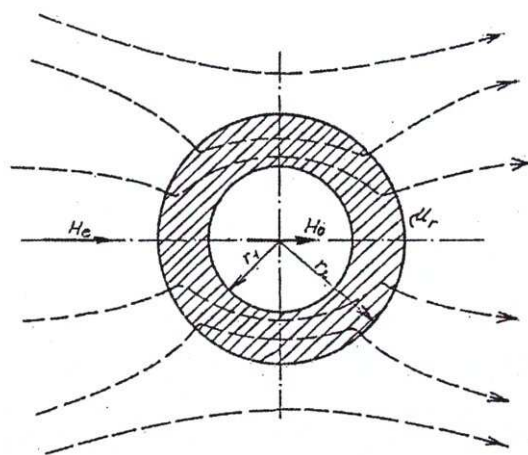
Principy strukturoskopických metod

Uspořádání snímací jednotky a řešení vyhodnocovací části signálu závisí na magnetické veličině, kterou se sleduje strukturně mechanický stav výrobku. Důležitým požadavkem je dostatečná rychlost kontroly. V praxi často nelze použít laboratorní měřicí metody, u nichž je obvykle potřeba opatřit měřený vzorek magnetizačním a měřicím vinutím, nebo jej upínat do magnetizačního jha.

Principy se stejnosměrným či kvazistatickým magnetickým polem

Při těchto zkouškách je budicí magnetické pole časově neměnné nebo mají jeho změny velmi nízkou frekvenci (desetiny Hz), indukce vířivých proudů v materiálu je nulová nebo zanedbatelná a při kontrole se sledují změny vybraného magnetického parametru. Volba kontrolního principu závisí zejména na tvaru kontrolovaného výrobku.

U výrobku s dutinou (např. ložiskový kroužek) se dá využít magnetického stínění podle *obr. 2.14*. Magnetuje-li se takovýto výrobek příčným stejnosměrným magnetickým polem, část magnetických indukčních čar se vychýlí mimo dutinu do magneticky vodivějších stěn kroužku a v dutině magnetické pole poklesne.



Obr. 2.14 Metoda magnetického stínění [6]

Velikost stínění závisí na permeabilitě kroužku a jeho rozměrech, přibližně podle vztahu (14) odvozeného pro nekonečně dlouhou trubku.

$$\eta = \frac{H_0}{H_e} = \frac{4}{\mu_r} * \frac{1}{1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2} \quad (14)$$

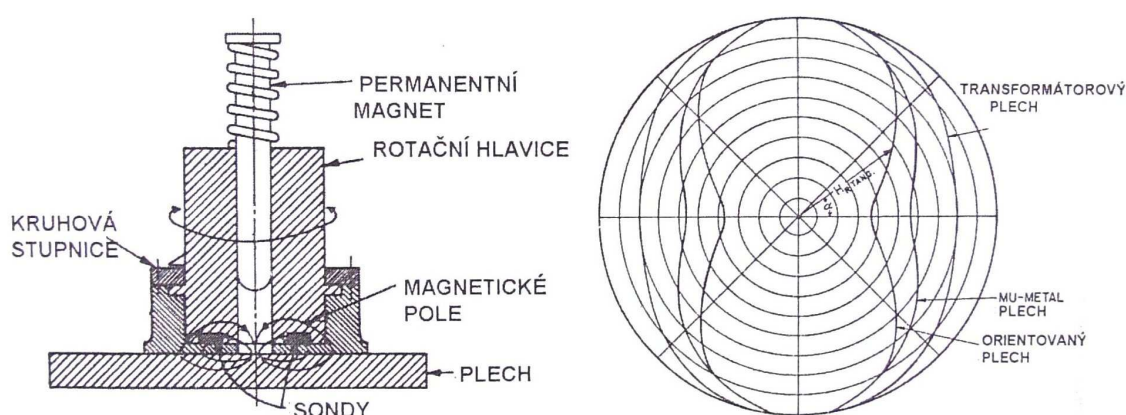
Kde je:

r_1 ... vnitřní poloměr trubky

r_2 ... vnější poloměr trubky

Jinou možností je měření remanentního magnetického pole v blízkosti vzorku po jeho stejnosměrném zmagnetování. Vzhledem k tomu, že kontrolované výrobky mají často velký demagnetizační činitel, je relace mezi remanentní indukcí B_r a koercivitou H_C lineární.

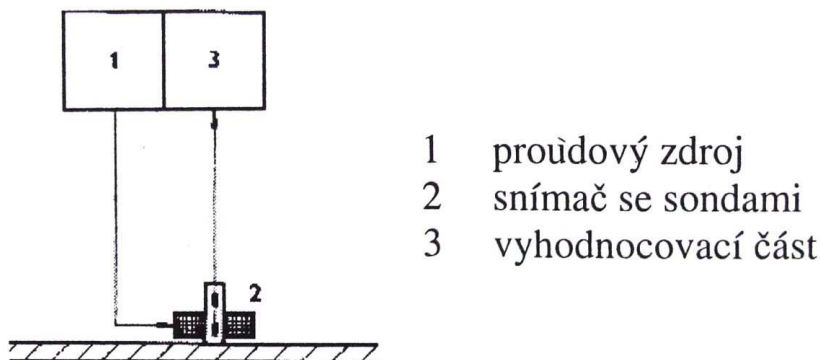
Pro rozměrnější výrobky např. plechy, odlitky apod. lze použít metodu označovanou jako metoda bodového pólu. Měřicí hlavice je na obr. 2.15. Přitlačením permanentního magnetu se vytvoří na povrchu plechu „bodový pól“ a po jeho oddálení se měří tangenciální složka zbytkového pole feromagnetickými sondami. Lze takto změřit magnetickou orientaci plechů pro elektrotechniku, jak ukazuje obr. 2.15.



Obr. 2.15 Aplikace metody bodového pólu měřicí hlavicí [6]

Přítomnost permanentního magnetu působí rušivě na sondy, takže je výhodnější generovat magnetizační pole proudovým pulsem do magnetizační

cívky snímače (obr. 2.16). Tento puls se vytvoří buď vybitím kondenzátoru do cívky snímače, nebo je generován programovatelným proudovým zdrojem. Tvarování proudového pulsu (např. strmosti jeho nástupní hrany) způsobuje v magnetovaném povrchu jinou odezvu (vlivem vířivých proudů) a přináší možnost diagnostikovat přítomnost a konfiguraci některých strukturních složek.



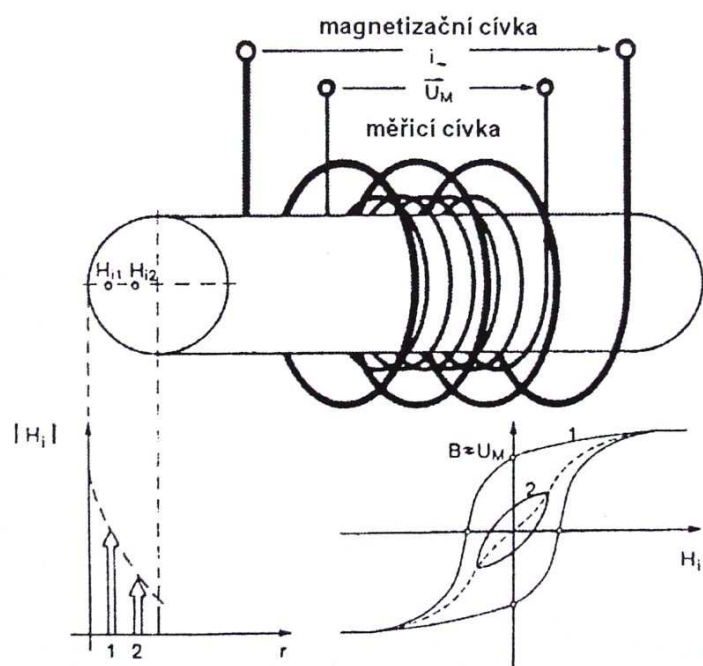
Obr. 2.16 Generování bodového pólu proudovým zdrojem [6]

Jiný princip, jenž strukturní stav zjišťuje na základě měření magnetické indukce, využívá přístroj sestávající ze zdroje magnetizačního proudu trojúhelníkového tvaru velmi nízkého kmitočtu (cca 1 Hz), ze snímací jednotky s magnetizačním a měřicím vinutím, integračního zesilovače a zobrazovací jednotky. Přemagnetováním kontrolované součásti ve snímači se indukuje v měřicím vinutí napětí, jehož integrací v integračním zesilovači se získá údaj úměrný magnetické indukci B . Velikostí magnetizačního proudu lze volit velikost rozkmitu hysterezní smyčky a tím i optimální podmínky kontroly. Vzhledem k nízkému kmitočtu magnetizačního proudu není získaná informace zkreslena vířivými proudy a odpovídá pouze magnetickým vlastnostem materiálu.

Výhodou metod, využívajících při kontrole stejnosměrná nebo jen pomalu se měnící magnetické pole, je téměř neomezený průnik magnetického pole do výrobku.

Principy se střídavým magnetickým polem

Použitím střídavých magnetizačních proudů, s kmitočty v oblasti desítek Hz až jednotek kHz, je v měřicím signálu ze snímače zastoupena nejen informace daná magnetickými vlastnostmi, ale také indukovanými proudy v materiálu, jejichž velikost závisí mj. na elektrické vodivosti kontrolovaného výrobku. Základní princip zkoušení je ukázán na obr. 2.17.



Obr. 2.17 Princip metod se střídavým magnetickým polem [6]

Je-li budicí vinutí napájeno relativně malým proudem sinusového průběhu, je maximální amplituda intenzity budicího pole také relativně malá. Zkoušený materiál se nachází v magneticky nenasyceném stavu a indukované napětí v měřicím vinutí má také sinusový průběh.

Pokud se intenzita budicího pole zvýší, dojde vlivem výrazné nelinearity hysterezní smyčky v oblasti nasycení ke zkreslení indukovaného napětí. Toto napětí bude obsahovat kromě základní harmonické také vyšší harmonické složky. Změnou intenzity budicího pole v poměrně širokém rozsahu je možné více či méně magneticky nasycovat zkoušený materiál a tím ovlivňovat množství a velikost vyšších harmonických složek ve změřeném signálu.

Vyšší harmonické signálu jsou z hlediska kvality zkoušení významným parametrem, neboť zkoušené vlastnosti materiálu se často projevují až

v zastoupení vyšších harmonických. Rozlišení dvou, svými vlastnostmi velmi podobných materiálů na základě pouze 1. harmonické změřeného signálu není v řadě případů možné. Typickým příkladem pro rozlišení vyššími harmonickými jsou právě změny struktury.

Dalším zkušebním parametrem, který významně ovlivňuje měření je zkušební frekvence. Ta má rozhodující vliv na rozložení magnetického pole v materiálu a na hloubku vniku.

Metody se střídavým magnetickým polem lze pro zkoušení vlastností kovových materiálů použít několika způsoby. Nejjednodušším způsobem je jednofrekvenční zkoušení, kdy pro danou zkušební úlohu je zvolena optimální zkušební frekvence a nastaven optimální budicí proud. Výhodou této koncepce je jednoduchost a rychlost zkoušení. Takto byla koncipována konstrukce přístrojů starší generace. Určitou nevýhodou může být u náročnějších zkušebních úloh nižší spolehlivost měření.

Víceparametrické zkoušení

Přístroje nové generace umožňují víceparametrické zkoušení. Podstatou víceparametrického zkoušení je kombinace různých zkušebních frekvencí a budicích proudů tak, aby byla maximálním možným způsobem zvýšena spolehlivost kontroly. Jednotlivé vlastnosti zkoušeného materiálu se při různém nastavení zkušební frekvence a budicího proudu projevují různě silně. Lze tedy vybrat několik nastavení parametrů přístroje, při kterých se jednotlivé zkoušené vlastnosti materiálů projevují nejsilněji a s takto optimalizovanými parametry přístroje daný materiál současně zkoušet. Tím se dostane řada dílčích výsledků (pro každou sadu parametrů přístroje jeden výsledek), jejichž vzájemným porovnáním a automatickým vyhodnocením se získá jednoznačný zkušební výsledek.

Principiálně lze víceparametrické zkoušení rozdělit na tzv.:

- sériové zkoušení, kdy dochází ke zkoušení jednotlivými frekvencemi postupně za sebou. Výhodou sériového zkoušení je možnost optimálního nastavení jednotlivých parametrických sad pro danou zkušební úlohu, neboť ke každé zvolené zkušební frekvenci lze nastavit optimální velikost budicího proudu. Určitým omezením však někdy může být nižší zkušební rychlost.

- paralelní zkoušení, kdy se zkouší všemi nastavenými frekvencemi najednou pomocí budicího proudu, jehož průběh je definován superpozicí všech nastavených frekvencí. Charakteristická je vysoká zkušební rychlost. Na rozdíl od sériového zkoušení nelze pro jednotlivé zkušební frekvence nastavit optimální velikost budicích proudů, neboť všechny frekvence využívají pouze jeden složený budicí proud.

- pulzní zkoušení je další variantou víceparametrického zkoušení. Pulzní signál lze rozložit na součet základní harmonické signálu a teoreticky nekonečné množství vyšších harmonických. Výhodou tohoto řešení je vysoká spolehlivost měření, neboť tento způsob simuluje současné měření mnoha frekvencemi. Také u pulzního zkoušení nelze pro jednotlivé zkušební frekvence obsažené v impulsu nastavit optimální velikost budicích proudů.

2.4 Princip metody magnetické skvrny

U zkoušeného objektu se pomocí magnetického pole cívky sondy vytváří na povrchu objektu magnetická skvrna. Dochází zde k růstu domén posunem Blochových stěn a polarizací shodnou s vnějším magnetickým polem, nebo dochází ke skokové změně polarizace tzv. Barkhausenovými přeskoky. Tvar proudového impulsu vedený do příložené silové cívky, případně přesně definovaný jejich sled definuje tok parazitních vířivých proudů (lze je využít k potlačení vlivu demagnetizačního činitele $D_{(0)}$ a strukturně selektivní citlivost metody. Metody používané v Rusku a České Republice se právě odlišují v charakteristikách magnetizace a tím i v cíli aplikací. Po zániku vnějšího magnetického pole H se nevrátí všechny domény do původního stavu. Vzniká remanentní polarizace J_r . Zmagnetované místo má vlastní magnetické pole o intenzitě H_r . Platí vztah (12). Intenzita H_r v povrchové a podpovrchové vrstvě materiálu vzorku se měří Hallovou nebo Försterovou sondou. Příspěvek jednotlivých zrn feromagnetika na výsledné hodnotě H_r závisí na stínícím účinku a jejich vzdálenosti od snímače. S hloubkou průniku magnetizačního pole klesá vliv jednotlivých zrn na H_r . Strukturoskopy se nastavují podle magneticky tvrdého etalonu nebo normálu intenzity pole H .

Metoda využívá přímé souvislosti mezi intenzitou H_r a strukturně-mechanickým stavem materiálu. Například souvislost mezi mechanickou a magnetickou tvrdostí materiálu je dána přítomností magneticky tvrdých

strukturních složek (lamely perlitického cementitu, martenzit), které jsou zároveň i mechanicky tvrdé.

Díky stálému vývoji této metody lze měřit nejen tvrdost feromagnetických materiálů, ale i pevnost či hloubku prokalení. V porovnání s klasickými způsoby měření tvrdosti je tato metoda velmi rychlá, nedestruktivní, jednoduchá na obsluhu. Umožňuje měřit tvrdost materiálu také přes povrchovou vrstvu.

V současné době se k měření metodou magnetického bodového pólu používá přístrojů řady DOMENA, které navazují na předchozí sérii přístrojů REMAG.

2.5 Přístroj DOMENA B3.b

2.5.1 Popis přístroje

DOMENA B3.b je přenosný, v tomto provedení bateriově napájený přístroj, nezávislý na stálém vnějším napájení.

Přístroj má pro ovládání na čelním panelu k dispozici

- přepínač velikosti MAGNETIZACE v 8 stupních
- přepínač FUNKCE s funkcemi A, B, T, TT, L, LL
- klávesnici s dvanácti tlačítky
- čtyřmístný sedmisegmentový zobrazovač LED, výšky 14 mm
- indikační světla PAM, DATA, x, s
- přepínač akumulátorového zdroje VYP, NAB, ZAP se dvěma indikačními světly a jedním dvojitým světlem
- tlačítko START na sondě

pro další připojení

- konektor SND pro kombinovanou sondu
- konektor PC pro připojení počítače
- konektor 230V/60Hz pro připojení vnitřní nabíječky

pro jištění

- čtyři pojistky

2.5.2 Popis měření

Přístroj se zapne otočením přepínače akumulátorového zdroje do polohy *ZAP*. Přepínačem velikosti magnetizace se nastaví požadovaný magnetizační stupeň a přepínač funkce se otočí do polohy *T* pro nastavení kalibrace. Na displeji je zobrazena hodnota 1,00. Prostřednictvím klávesnice se zadá hodnota etalonu M_0 a potvrdí se tlačítkem *D*. K etalonu se přiloží čelo sondy a stiskne se tlačítko na sondě. Pro kontrolu úspěšné kalibrace je třeba přepínač funkce otočit do polohy *L* a provést kontrolní měření opětovným stisknutím tlačítka na sondě. Pokud se zobrazená hodnota od nastavované hodnoty neliší o více než 2 %, přístroj je kalibrován správně a je možné začít měření. Jinak je potřeba kalibraci opakovat. Měření probíhá při nastavení přepínače funkce v poloze *L* (3 magnetické pulzy) nebo *LL* (5 pulzů).

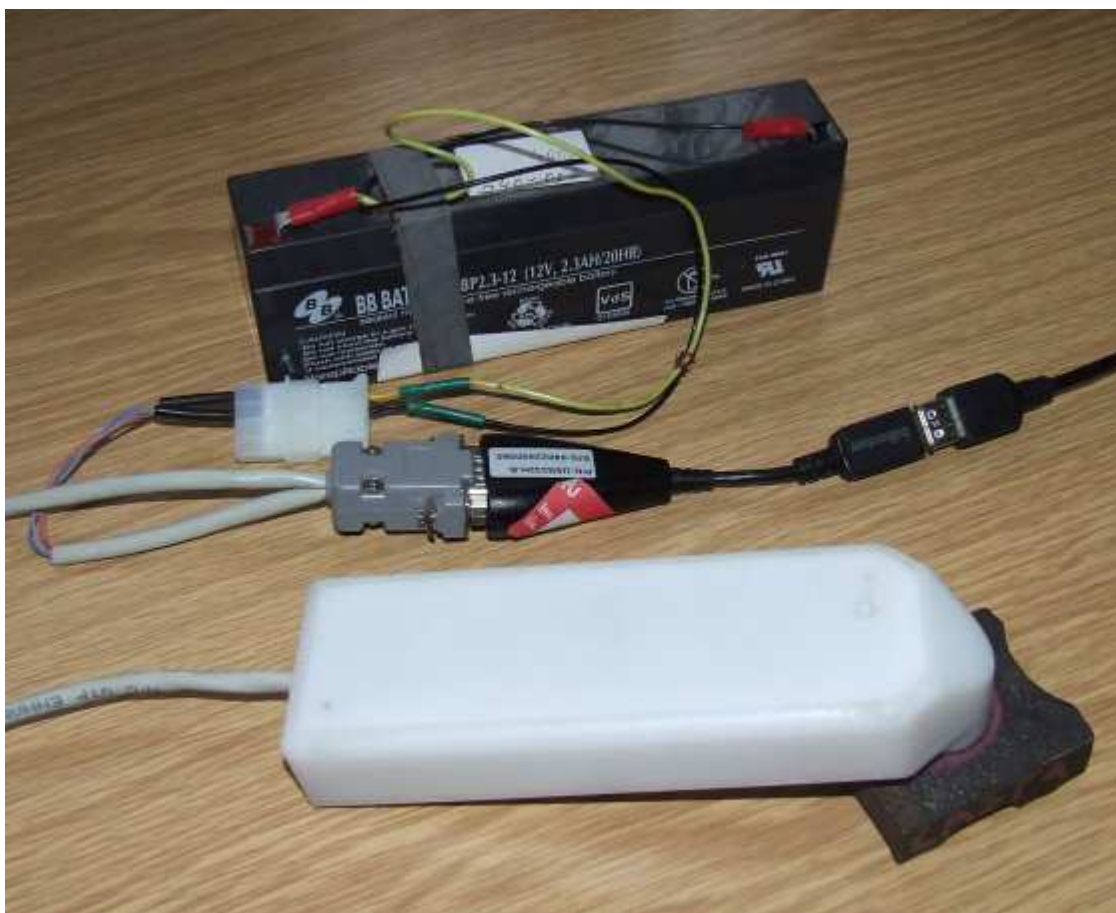


Obr. 2.18 Přístroj DOMENA B3.b [1]

2.6 Přístroj CASTA

Přístroj CASTA byl vyroben firmou BITRON s.r.o. pro projekt č. 1707 „nedest“ SF TU v Liberci. Je to jednoduchý ruční přístroj pro měření metodou magnetické skvrny navržený pro připojení k počítači pomocí sériového RS 232. Software kompatibilní s Windows umožňuje měnit parametry měření a v řádech milisekund sledovat napětí na Hallově sondě a vybíjeném kondenzátoru a magnetickou relaxaci materiálu. Parametry měření se mění jejich zapsáním do souboru CASTA.ini.

Výhoda tohoto přístroje je oproti přístrojům DOMENA především v možnosti nastavení libovolného počtu pulzů, počtu měřených vzorků, časů vzorkování atd. Tím lze sledovat změnu intenzity H_r po libovolně dlouhý časový úsek a zkoumat časový průběh stability magnetické skvrny a také magnetickou relaxaci materiálu. Z protokolu měření lze potom zjistit rozdíl „zbytkové magnetizace“ M [mV] (což je napětí na Hallově sondě) mezi libovolnými dvěma magnetickými pulzy měřené po odeznění magnetizačního pulzu na povrchu v ose snímače Hallovou sondou.



Obr. 2.19 Přístroj CASTA

Tab. 2.1 *Stručný popis parametrů měření nastavitelných v souboru CASTA.ini*

T0_PWR	start zdroje 90V - á 1ms
T1_SW	max. doba nabíjení pracovního kondenzátoru - á 1ms
T2_BOOT	doba pro nabíjení bootstrap kapacity - á 0.1ms
T3_ON	čas sepnutí spínačů - á 0.1ms
T4_MES	zahájení průběžného měření - bez čekání na konec T3
T5_WAIT	čekání na "uklidnění" vystup. signálu - á 1ms
T6_SAMPLE	pauza mezi jednotlivými vzorky - á 1ms
T7_PAUSE	pauza mezi jednotlivými měř. impulsy (neg/pos) - á 1ms
T8_NEXT	odstup před dalším měřicím cyklem - á 1ms
T9_BUTTON	"bezpečnostní zpoždění" - po čtení tlačítka
Parametry automatického měření	
BAUD	rychlost sériové komunikace (4800)
CYCLE_NUM	počet cyklů automatického režimu
SAMPLE_NUM	počet měřených vzorků na každý cyklus
MES_VOLT	startovací napětí kondenzátoru / 1,6
TOL_ABS	absolutní tolerance automatického režimu
TOL_REL	relativní toleranční pole automatického režimu (0.025)
DEBUG	úroveň diagnostických výstupů
COM	sériový port
Parametry podrobného měření	
KMER	kombinace měření (1 - hallovo napětí, 2 - napětí kondenzátoru, 3 - oba)
SAMPNUM	celkový počet snímaných vzorků
PRESAMP	počet vzorků před vysláním příkazu k impulsu
NPOL	polarita prvního pulzu
SPOL	střídat polarity
NMES	počet pulzů

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Měřené vzorky

Pro měření byly k dispozici následující vzorky:

Vzorek z LKG; 150 HB; matrice ferit; (ozn. „**Vzorek 297**“)

Destička z LKG; 220 HB; matrice 80 % ferit, 20 % perlit; (ozn. „**JS24**“)

Tab. 3.1 Chemické složení vzorku JS 24 (údaje v hm. %)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Ti	Mg	As	Sn	Al
2,94	0,115	3,38	0,025	0,008	0,028	0,029	0,056	0,006	0,007	0,008	0,066	0,008	0,008	0,023

Destička z LLG; 165 HB; matrice 90 % ferit, 10 % perlit; (ozn. „**JS24x**“)

Tab. 3.2 Chemické složení vzorku JS 24x (údaje v hm. %)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Ti	Mg	As	Sn	Al
3,02	0,139	3,88	0,026	0,012	0,026	0,029	0,065	0,004	0,006	0,010	0,003	0,006	0,008	0,010

Pozn.: Vzorky JS24 a JS24x byly měřeny ve dvou místech a to na vyznačeném místě ve středu vzorku (otrysaný povrch) a na odfrézovaném povrchu. Odtud „**JS24 (střed)**“ „**JS24 (vyfrézováno)**“ „**JS24x (střed)**“ a „**JS24x (vyfrézováno)**“.

Vzorek z LLG; 210 HB; matrice perlit; (ozn. „**Etalon CASTA**“)

Ocelový plech tloušťky 3 mm, ocel 14 260.3 (ozn. „**Plech 3 mm**“)

Ocelový plech tloušťky 9 mm, ocel 14 260.3 (ozn. „**Plech 9 mm**“)

(C 0,5 - 0,6 %; Si 1,5 - 1,6 %; Cr 0,5 - 0,7; HB max. 253)

Hlava ventilu z austenitické nemagnetické oceli s malou feritickou degradací (asi po 70 000 km; ozn. „**Ventil – malá degradace**“) a hlava s velkou feritickou degradací (asi po 200 000 km; ozn. „**Ventil – velká degradace**“)

Tab. 3.3 Označení materiálu ventilů. Odříznuté hlavy ventilů jsou z „A“ oceli a feromagnetické dříky z „S“

Označení podle:	S	A
DIN 17 007	1.4718	1.4871
DIN 17 006	X45CrSi 93	X53CrMnNiN 21 9
ČSN	17 115	17 465

Tab. 3.4 Chemické složení materiálu ventilů (údaje v hm. %)

Chemický prvek	S	A
C	0,4 – 0,5	0,48 – 0,58
Si	2,7 – 3,3	max. 0,25
Mn	max. 0,8	8,0 – 10,0
Cr	8,0 – 10,0	20,0 – 22,0
Ni	max. 0,5	3,25 – 4,5
N	-	0,38-0,50
S	max. 0,03	max. 0,03
P	max. 0,04	max. 0,04
Fe	zbytek	zbytek

Tab. 3.5 Chemické složení svařovacího materiálu (údaje v hm. %; oz. P37). Navařování obloukem nebo plamenem; tvrdost HRC min. 40; maximální žáruvzdornost a odolnost proti opotřebení

C	Si	Mn	Cr	Ni	Co	W	Fe
1,75	1,1	Max 0,3	25,5	22,5	zbytek	12,25	Max 1,35

3.2 Postup připojení přístroje CASTA k počítači

Připojení je možné provést dvěma způsoby. Buď přímo přes sériový RS 232 nebo pomocí redukce na USB. V případě použití redukce je potřeba do mechaniky vložit CD s ovladači a USB redukci připojit. V okně pro instalaci ovladače vybrat ruční instalaci a jako zdroj vybrat instalaci z CD. Z nabízených ovladačů pak vybrat ovladač pro Windows XP a nainstalovat

(byl použit OS Windows XP). Z CD je poté ještě potřeba nainstalovat program „COM port set utility“. USB redukce se při dalších použití přístroje musí připojit do stejného slotu. Při připojení přes RS 232 není instalace potřeba.

Dále je třeba připojit kabel napájení. Ten lze připojit na 12voltový akumulátor nebo na kabel napájení 12 V přímo z počítače (to v případě použití stolního počítače s možností otevření počítačové skříně).

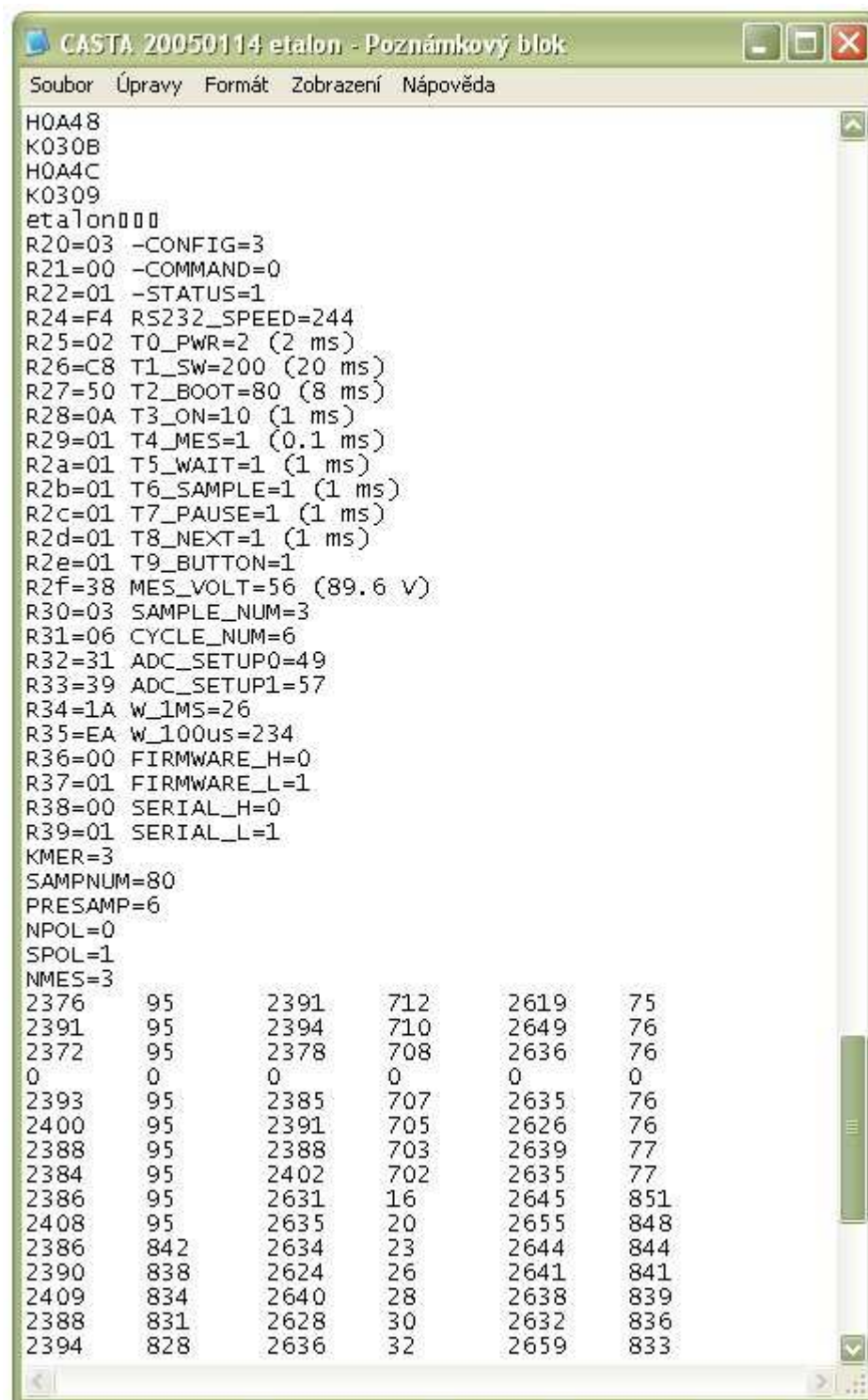
Pozn.: Nepodařilo se zprovoznit připojení přes USB redukci a to ani na stolním počítači ani na notebooku. Jako nejpravděpodobnější se jeví, jak bylo později zjištěno, patrně nemožnost změnit v programu přístroje CASTA nastavení portu z COM1 na jiný neobsazený port. Připojení bylo realizováno přes sériový RS 232 a napájení kabelem přímo z počítače. Napájení z baterie je též funkční. Zde je nutno poznamenat, že ačkoliv je nastavena hodnota nabití kondenzátoru na 89,6 V, při napájení z počítače je kondenzátor nabíjen na 95 V a při použití baterie na 92 V.

3.3 Měření přístrojem CASTA

Přístroj se připojí k počítači a ke zdroji elektrického proudu a spustí se program test1.exe. Poté se přístroj přiloží sondou ke vzorku v místě, kde chceme měřit, a stisknutím tlačítka na vrchní straně se započne automatický měřicí cyklus podle nastavených parametrů. Na obrazovce je otevřeno okno programu, do kterého lze po skončení měření napsat do řádku poznámky informace o vzorku. Stisknutím klávesy Enter je vytvořen textový dokument o proběhnutém měření.



Obr. 3.1 Okno programu test1.exe



Obr. 3.2 Protokol o proběhnutém měření: nejprve je do protokolu zapsán sloupec naměřených hodnot v šestnáctkové soustavě, následuje řádek (řádky) s poznámkami vloženými na konci měření. Další hodnoty na řádcích R20 až R39 a na následujících šesti řádcích jsou parametry měření. Závěrečných 6 sloupců čísel odpovídá naměřeným hodnotám M a U_c (napětí na Hallově sondě a na kondenzátoru) během tří magnetických pulzů.

Bohužel již od počátku mého měření tímto přístrojem nebylo možné parametry měření měnit. Od poslední opravy přístroj sice měří, ale stále ve stejném cyklu. Magnetické pulzy proběhnou vždy jen dva, a při každém je snímáno 500 vzorků. To mimo jiné znamená, že jedno měření trvá celou jednu minutu.

Aby bylo možné hodnotit strukturní stav materiálu, případně jeho vlastnosti a porovnávat měření se strukturoskopem DOMENA, je potřeba do materiálu vyslat minimálně 3 magnetické pulzy (pro přesnější měření však pravděpodobně 5), kvůli uklidnění velikosti zbytkové magnetizace. Toto vícenásobné magnetování materiálu, kterého mělo být původně dosaženo během jednoho měření nastavením hodnoty „NMES“, bylo nahrazeno několika bezprostředně po sobě následujícími měřeními ve stejném místě vzorku.

Pro ověření přesnosti a zjištění optimálního počtu magnetických pulzů byly na každém vzorku provedeny 4 měřicí cykly, tedy 8 magnetických pulzů. Pro vyhodnocení naměřených hodnot je potřeba sloupce čísel zkopírovat a vložit do dokumentu Microsoft Excel, kde s nimi lze dále pracovat.

Získání hodnoty M ze souboru naměřených hodnot

Hodnota M [mV] je napětí na Hallově sondě vyvolané zbytkovým magnetickým polem H_r [A·m⁻¹]. Hodnoty jsou v přímé úměře ($M = k \cdot H_r$)

1. krok - vytvoření průměrných hodnot z každého sloupce výsledků

Uvažují se hodnoty od první po vybití kondenzátoru až po konec sloupce. Několik hodnot na začátku dalšího sloupce před dalším magnetickým pulzem není uvažováno, kvůli potřebě jednoduchosti vzorce a také proto, že pro poslední pulz tyto hodnoty dostupné nejsou.

Průměr po každém pulzu lze označit jako „ø1“, „ø2“, „ø3“ atd.

2. krok - Výpočet hodnoty M

Ten se rovná absolutní hodnotě rozdílu dvou sousedních průměrů, tedy $M_{1-2} = \text{Abs}(\text{ø1} - \text{ø2})$, $M_{2-3} = \text{Abs}(\text{ø2} - \text{ø3})$.

V textu a tabulkách bez poznámky, o kterou hodnotu se jedná, je to vždy M_{2-3} . Tam kde jsou použity i jiné hodnoty rozdílů je to vždy označeno (např. v *tab. 3.7* až *3.16* „Mezi 4. - 5. pulzem“), aby nemohlo dojít k záměně. Výsledky jsou pro použití a porovnání zaokrouhleny na desetiny.

	$M_{1,2} = \text{Abs}(\varnothing 1 - \varnothing 2)$		208,0303	$M_{2,3}$	203,7879	
$\varnothing 1$	1599,485	$\varnothing 2$	1807,515	$\varnothing 3$	1603,727	
	1704	94	1608	71	1812	71
	1702	95	1596	71	1813	71
	1715	94	1593	72	1809	72
	0	0	0	0	0	0
	1720	94	1593	72	1808	72
	1721	94	1594	72	1794	72
	1708	94	1605	73	1806	73
	1721	94	1597	73	1812	73
	1604	13	1812	13	1614	16
	1610	17	1803	17	1598	19
	1594	20	1816	19	1605	22
	1596	22	1809	21	1610	24
	1592	24	1805	23	1612	27
	1620	26	1795	25	1613	29
	1585	28	1808	27	1601	31
	1595	29	1803	29	1597	32

Obr. 3.3 Ukázka výpočtu v programu Microsoft Excel. Barevně označena pole s výsledky a sloupce použitých hodnot (ty pokračují ještě dále, zobrazen je jen výřez)

3.3.1 Optimální počet pulzů a opakovatelnost měření

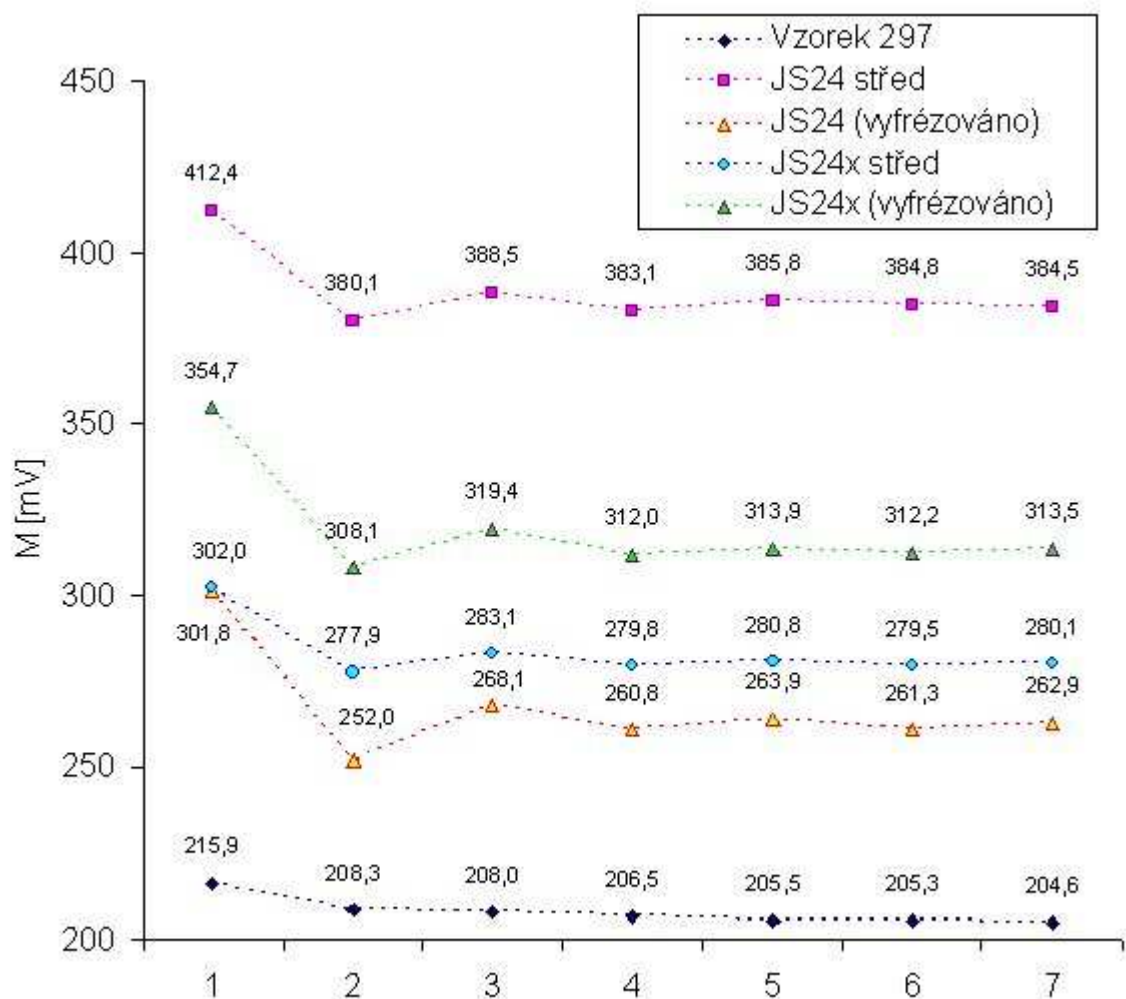
Přístroje DOMENA zobrazují hodnotu rozdílu zbytkové magnetizace mezi druhým a třetím magnetickým pulzem. Tab. 3.6 a z ní vytvořený Graf 3.1 ukazují hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace mezi prvním až osmým pulzem u vybraných vzorků měřených přístrojem CASTA.

Pokud budeme uvažovat hodnoty mezi druhým a třetím pulzem (sloupec hodnot 2-3) je z grafu patrné, že ve většině případů jsou to hodnoty lehce pod průměrnou hodnotou (v tabulce uvedený průměr je vypočten z hodnot sloupců 3-4 až 7-8). Největší odchylku sloupce 2-3 vykazuje vzorek JS24 (vyfrézováno) a to 4,3 % od průměrné hodnoty. Ostatní odchylky jsou do 2 %. Počínaje sloupcem 4-5 jsou odchylky od průměrné hodnoty vždy do 1 %.

Po měření stejného vzorku několikrát co nejpřesněji v jednom místě lze říci, že pro vyhodnocení skutečně plně postačují hodnoty mezi 2. a 3. pulzem. Rozdíly hodnot mezi jednotlivými měřeními jsou takové, že vyšší přesnost dosažená odečtením hodnot například mezi 4. a 5. měřením je zpravidla zbytečná. Ukázáno je to v tabulkách. 3.7 až 3.16.

Tab. 3.6 Hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace M [mV] mezi 1. až 8. pulzem u vybraných vzorků. (CASTA)

mezi pulzy vzorky	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	$\varnothing M$
Vzorek 297	215,9	208,3	208,0	206,5	205,5	205,3	204,6	206,0
JS24 (střed)	412,4	380,1	388,5	383,1	385,8	384,8	384,5	385,3
JS24 (vyfrézováno)	301,8	252,0	268,1	260,8	263,9	261,3	262,9	263,4
JS24x (střed)	302,0	277,9	283,1	279,8	280,8	279,5	280,1	280,7
JS24x (vyfrézováno)	354,7	308,1	319,4	312,0	313,9	312,2	313,5	314,2



Graf 3.1 Hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace M [mV] mezi 1. až 8. pulzem u vybraných vzorků (CASTA)

Tab. 3.7 Hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace M [mV] při čtyřech měřeních ve stejném místě **vzorku 297**

číslo měření	1.	2.	3.	4.	\bar{M}	σ odchylka
mezi 2. - 3. pulzem	208,3	203,8	204,6	202,3	204,8	1,76
mezi 4. - 5. pulzem	206,5	203,8	203,0	200,6	203,5	1,69

Tab. 3.8 Hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace M [mV] při čtyřech měřeních ve stejném místě **vzorku JS24 (střed)**

číslo měření	1.	2.	3.	4.	\bar{M}	σ odchylka
mezi 2. - 3. pulzem	380,1	370,3	377,8	371,7	375,0	3,98
mezi 4. - 5. pulzem	383,1	375,7	377,8	370,0	376,7	3,80

Tab. 3.9 Hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace M [mV] při čtyřech měřeních ve stejném místě **vzorku JS24 (vyfrézováno)**

číslo měření	1.	2.	3.	4.	\bar{M}	σ odchylka
mezi 2. - 3. pulzem	252,0	263,3	261,4	269,0	261,4	4,73
mezi 4. - 5. pulzem	260,8	259,9	261,1	267,6	262,3	2,62

Tab. 3.10 Hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace M [mV] při čtyřech měřeních ve stejném místě **vzorku JS24x (střed)**

číslo měření	1.	2.	3.	4.	\bar{M}	σ odchylka
mezi 2. - 3. pulzem	277,9	269,3	283,8	286,5	279,4	5,75
mezi 4. - 5. pulzem	279,8	277,2	280,7	283,1	280,2	1,70

Tab. 3.11 Hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace M [mV] při čtyřech měřeních ve stejném místě **vzorku JS24 (vyfrézováno)**

číslo měření	1.	2.	3.	4.	\bar{M}	σ odchylka
mezi 2. - 3. pulzem	308,1	313,5	311,7	299,6	308,2	4,40
mezi 4. - 5. pulzem	312,0	304,1	309,6	297,8	305,9	4,94

Tab. 3.12 Hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace M [mV] při čtyřech měřeních ve stejném místě vzorku **Etalon CASTA**

číslo měření	1.	2.	3.	4.	$\varnothing M$	\varnothing odchylka
mezi 2. - 3. pulzem	1092,8	1059,4	1030,5	1070,6	1063,3	18,37
mezi 4. - 5. pulzem	1104,8	1058,3	1027,6	1070,2	1065,2	22,28

Tab. 3.13 Hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace M [mV] při čtyřech měřeních ve stejném místě vzorku **Plech 3 mm**

Číslo měření	1.	2.	3.	4.	$\varnothing M$	\varnothing odchylka
mezi 2. - 3. pulzem	1491,1	1535,5	1554,4	1590,6	1542,9	29,60
mezi 4. - 5. pulzem	1524,0	1566,4	1548,2	1584,3	1555,7	19,64

Tab. 3.14 Hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace M [mV] při čtyřech měřeních ve stejném místě vzorku **Plech 9 mm**

číslo měření	1.	2.	3.	4.	$\varnothing M$	\varnothing odchylka
Mezi 2. - 3. pulzem	908,5	922,8	965,3	978,6	943,8	28,15
Mezi 4. - 5. pulzem	949,8	955,1	961,5	974,9	960,3	7,87

Tab. 3.15 Hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace M [mV] při čtyřech měřeních ve stejném místě vzorku **Ventil – malá degradace**

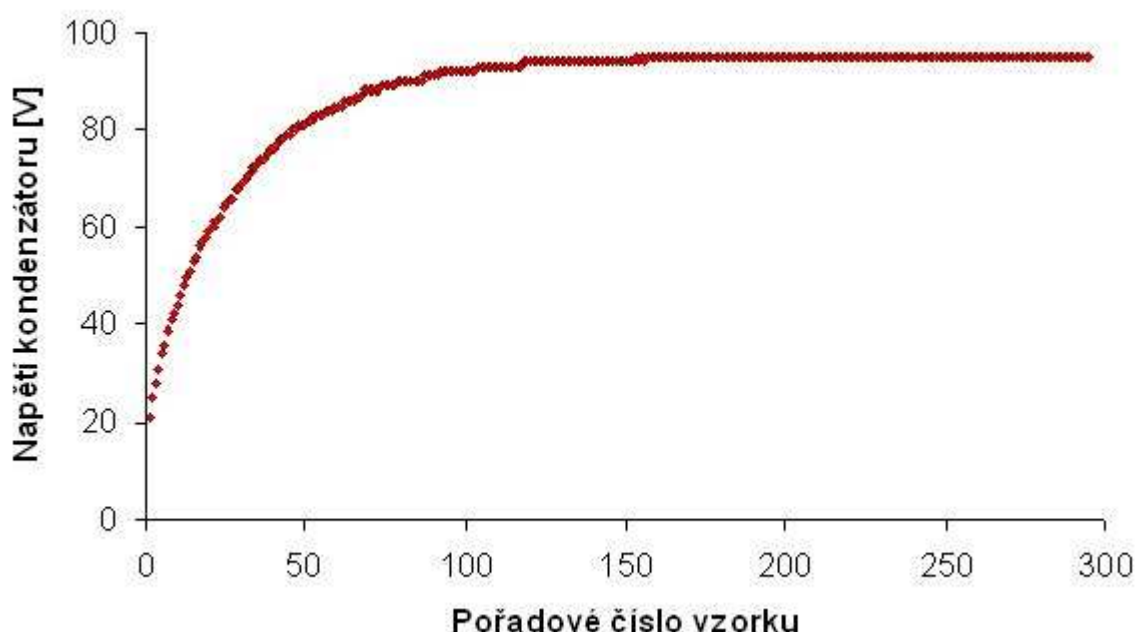
číslo měření	1.	2.	3.	4.	$\varnothing M$	\varnothing odchylka
Mezi 2. - 3. pulzem	788,0	533,9	543,5	574,4	609,9	89,02
Mezi 4. - 5. pulzem	785,9	531,6	542,4	572,6	608,1	88,88

Tab. 3.16 Hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace M [mV] při čtyřech měřeních ve stejném místě vzorku **Ventil – velká degradace**

číslo měření	1.	2.	3.	4.	$\varnothing M$	\varnothing odchylka
Mezi 2. - 3. pulzem	1205,3	1002,1	1130,4	1132,9	1117,7	57,79
Mezi 4. - 5. pulzem	1203,7	992,2	1131,2	1132,5	1114,9	61,35

3.3.2 Nabíjení pracovního kondenzátoru

Vyslání magnetického pulzu do vzorku je zprostředkováno vybitím kondenzátoru. Ten je poté ze zdroje elektrického proudu opět nabit. Pro současná měření se používají magnetické pulzy stejné intenzity v rámci každého měření. Aby toto bylo zajištěno, musí být kondenzátor dostatečně nabit.



Graf 3.2 *nabíjení kondenzátoru mezi jednotlivými magnetickými pulzy*

Z grafu 3.2 je patrné, že kondenzátor je nabit na maximální hodnotu asi po 160 vzorcích (v reálném čase je to přibližně 10 vteřin). Počet vzorků však platí pouze pro nastavené, v současnosti neměnné, parametry. Například změna proměnné T6_SAMPLE (pauza mezi vzorky) by měla změnit počet vzorků, po které se ještě bude kondenzátor nabíjet. Při dřívějších měřeních, kdy byl ještě přístroj CASTA plně funkční, bylo nutné nastavit parametry měření tak, aby bylo spolehlivě dosaženo plného nabití. Ze starších protokolů je patrné, že tomu tak vždy nebylo (patrně ze snahy zrychlit měřicí cyklus) a energie vložená do materiálu byla nižší. Ne však vždy stejná. O tom, jaký vliv na naměřené hodnoty má nižší energie do materiálu vložená bude pojednáno dále.

3.4 Měření přístrojem DOMENA B3.b

Pro ověření a porovnání výsledků bylo provedeno také měření na přístroji DOMENA B3.b. Po zapnutí přístroje a nastavení pomocí etalonu bylo provedeno vždy 10 měření při nastaveném stupni magnetizace 1 a 10 měření při nastaveném stupni 8 na každém vzorku. Měření byla přístrojem statisticky vyhodnocena a byly tak získány průměrné hodnoty s průměrnými odchylkami měření.

Tab. 3.17 Hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace M [mV]

Měřené vzorky	Stupeň magnetizace 1		Stupeň magnetizace 8	
	$\bar{\sigma}M$	σ odchylka	$\bar{\sigma}M$	σ odchylka
Vzorek 297	57,0	4,8	54,8	2,1
JS24 (střed)	101	7,4	94,8	2,4
JS24 (vyfrézováno)	75,1	5,1	73,4	0,9
JS24x (střed)	64,3	3,4	66,9	2,9
JS24x (vyfrézováno)	75,5	6,2	78,4	6,8
Etalon CASTA	297	8,3	265	6,0
Pech 3 mm	223	7,8	317	5,1
Plech 9 mm	130	3,1	209	3,2
Ventil - malá degradace	295	20,3	136	11,9
Ventil - velká degradace	778	19,2	276	14,7

Protože je možno DOMENU propojit s počítačem přes RS 232, byl také proveden pokus o přenesení hodnot do počítače. Po instalaci z diskety a úspěšném spuštění potřebného programu měly být naměřené hodnoty přeneseny stisknutím tlačítka B. V počítači však chyběl program Microsoft Excel, do něhož měla být data zkopírována. To bylo patrně příčinou neúspěchu, jinak by měl být přenosový program funkční.

3.5 Porovnání hodnot naměřených oběma přístroji

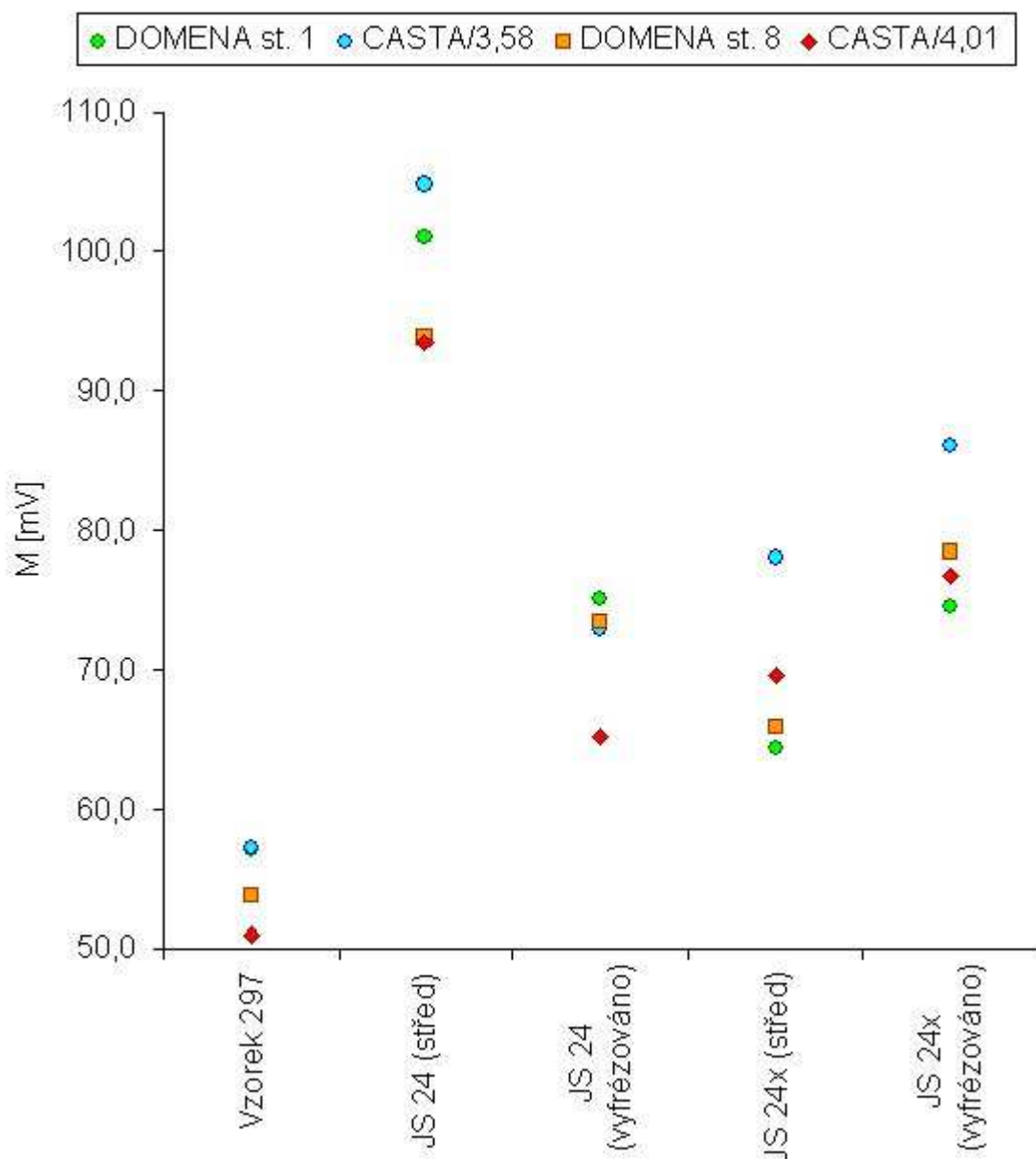
Pro porovnání jsou použity průměrné hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace M [mV] mezi 2. a 3. pulzem ze čtyř provedených měření na každém vzorku přístrojem CASTA a průměrné hodnoty rozdílu zbytkové magnetizace z měření DOMENOU při stupni magnetizace 1 a 8.

Protože oba přístroje dávají jako výstup relativní čísla, jsou všechny hodnoty vztaženy na hodnoty vzorku Etalon CASTA. Prakticky to znamená, že hodnoty naměřené CASTOU jsou poděleny koeficientem 3,58 ($=1063,3/297$) pro porovnání s hodnotami stupně magnetizace 1 přístroje DOMENA a koeficientem 4,01 ($=1063,3/265$) pro hodnoty stupně magnetizace 8.

Tab. 3.18 Tabulka změřených a přepočítaných hodnot M [mV]

Měřené vzorky	CASTA	Stupeň magn. 1	CASTA/ 3,58	Stupeň magn. 8	CASTA/ 4,01
Vzorek 297	204,8	57,0	57,2	54,8	51,0
JS24 (střed)	375,0	101	104,7	94,8	93,5
JS24 (vyfrézováno)	261,4	75,1	73,0	73,4	65,1
JS24x (střed)	279,4	64,3	78,0	66,9	69,6
JS24x (vyfrézováno)	308,2	75,5	86,1	78,4	76,8
Etalon CASTA	1063,3	297	297,0	265	265,0
Pech 3 mm	1542,9	223	431,0	317	384,5
Plech 9 mm	943,8	130	263,6	209	235,2
Ventil - malá degradace	609,9	295	170,4	136	152,0
Ventil - velká degradace	1117,7	778	312,2	276	278,6

Některé souvislosti ukazují o něco názorněji *grafy 3.4 a 3.5* vytvořené z *tabulky 3.18*. Hodnoty změřené CASTOU si více odpovídají (v příslušném poměru) s hodnotami měřenými při stupni magnetizace 8 přístroje DOMENA než při stupni 1.



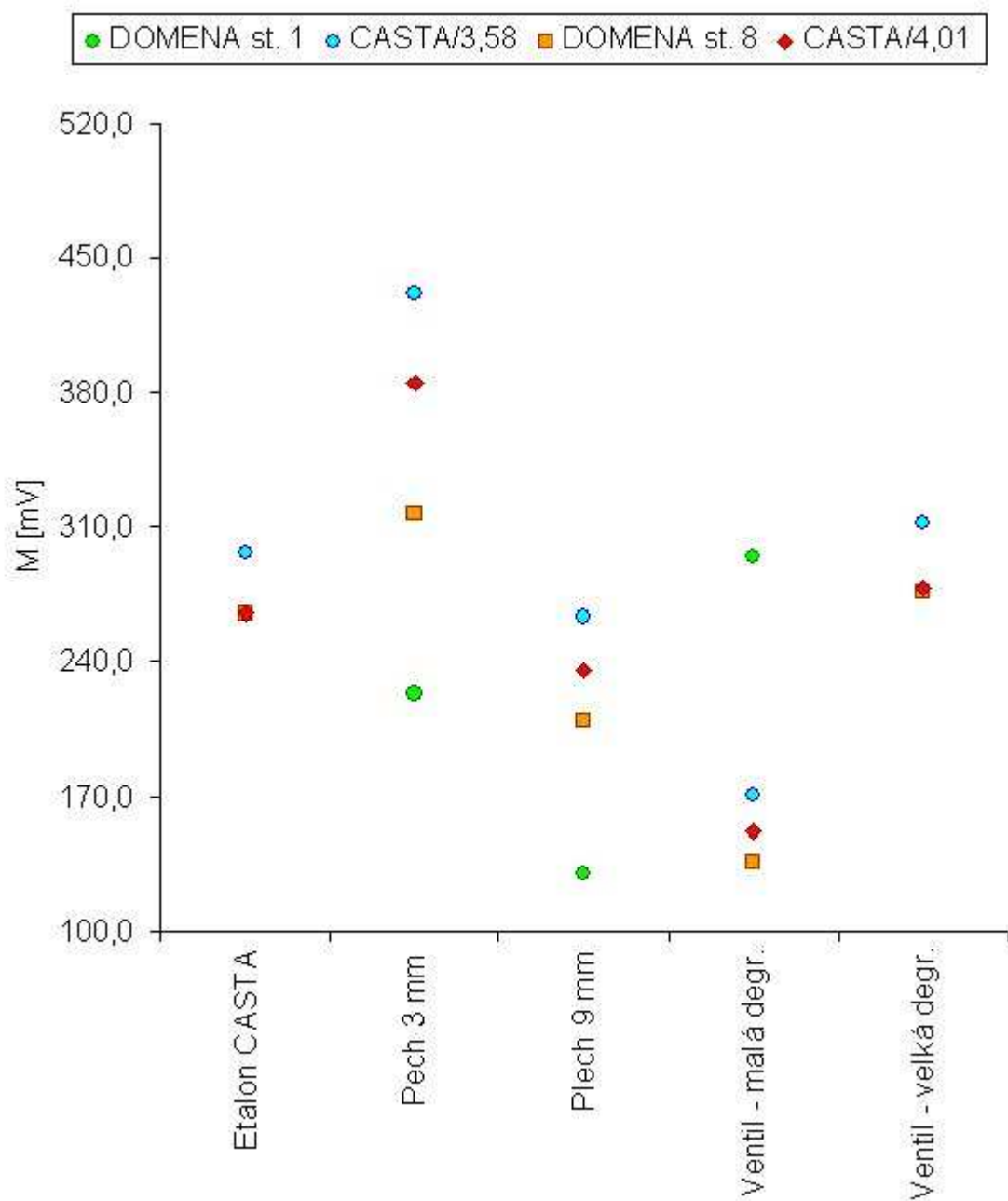
Graf 3.3 Porovnání hodnot naměřených oběma přístroji

U vzorku JS24 jsou naměřené hodnoty na vyfrézovaném povrchu nižší než na otryskaném povrchu u středu vzorku. U vzorku JS24x je tomu však naopak. Závěr o jednoznačném vlivu kvality povrchu na hodnoty zbytkové magnetizace proto z těchto měření nelze vyslovit. Je však pravděpodobné, že měření ovlivnil jiný faktor, například podpovrchová dutina v některém vzorku, nebo místní změna struktury. Náhodnou chybu měření lze vyloučit, neboť hodnoty jsou obdobné při všech měřeních oběma přístroji.

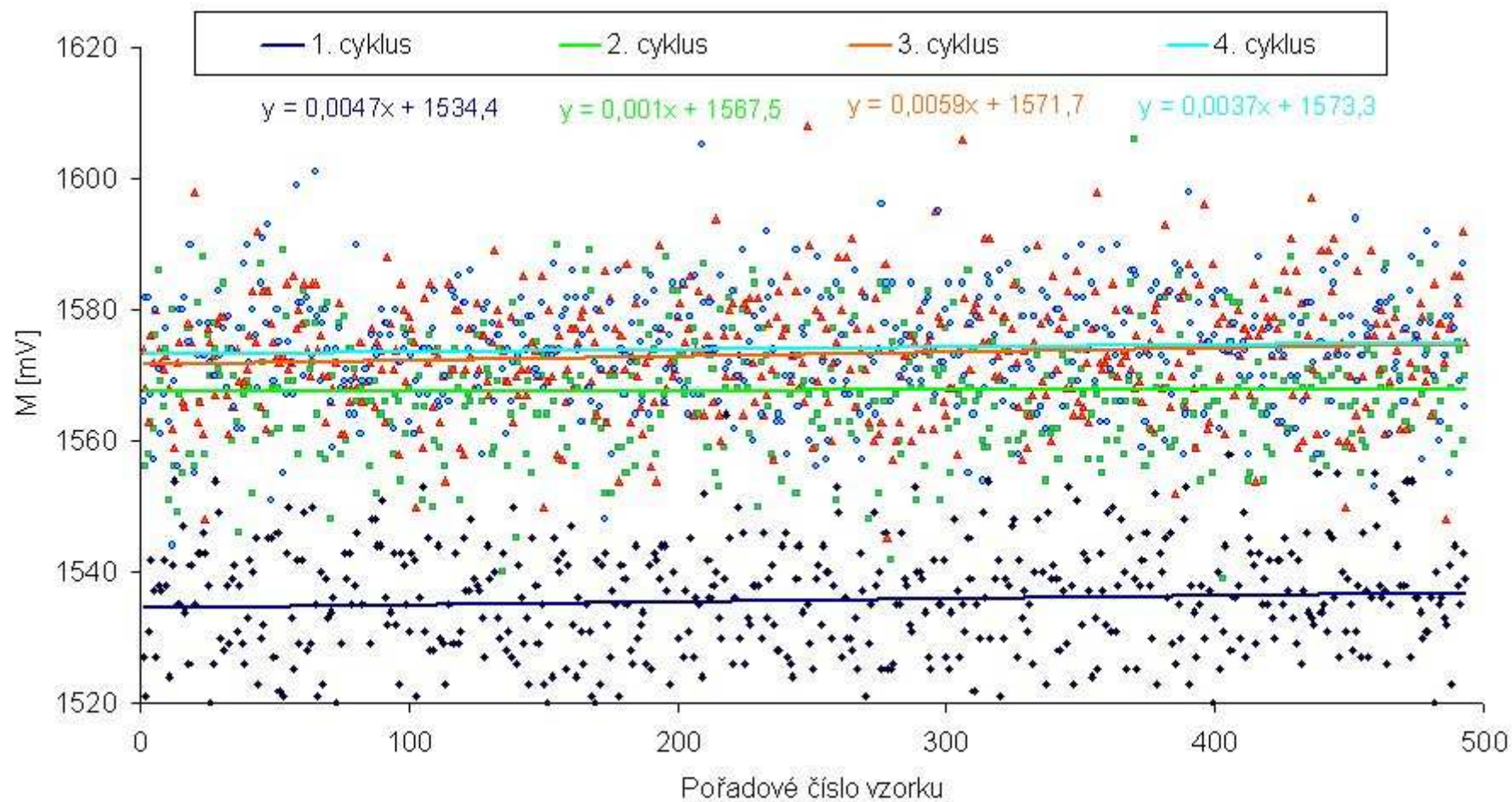
Plech 3 mm vykazuje oproti plechu 9 mm nárůst zbytkové magnetizace průměrně o 60 %. Vliv tloušťky plechu, již potvrzený ve výsledcích dřívější

práce [4], je i zde naprosto zřejmý. Navíc dokládá spolehlivost měření obou přístrojů.

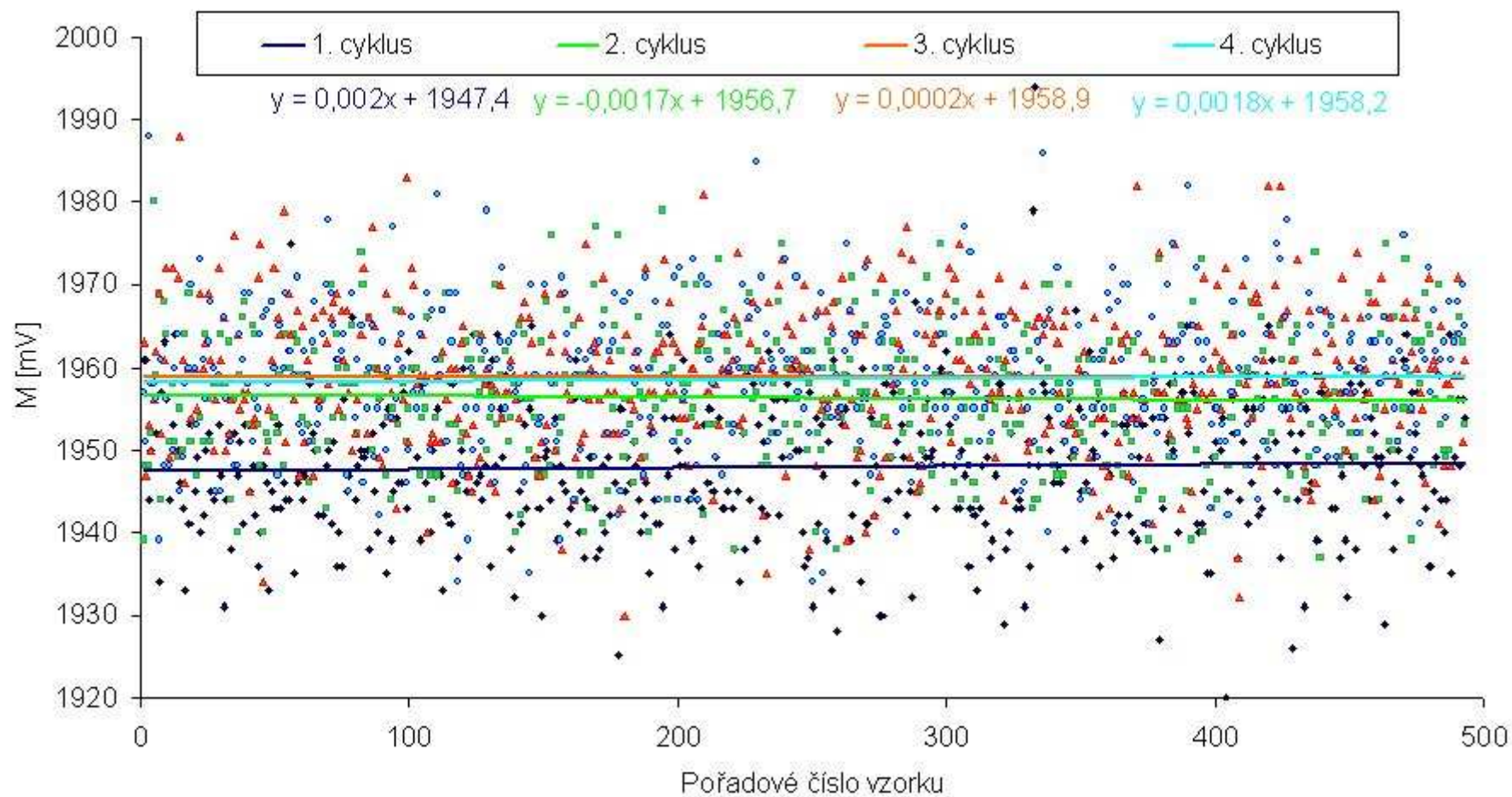
Měření na hlavách ventilů je sice zatíženo větší chybou, ale je zde i přesto velice dobře vidět rozdílná odpověď materiálu na magnetizaci pulzy o různé intenzitě. Kvůli tvaru hlavy ventilu a místu měření na ní je při práci třeba značné pečlivosti aby nedošlo ke vzájemnému posunu sondy a vzorku a to zejména při měření CASTOU.



Graf 3.4 Porovnání hodnot naměřených oběma přístroji (pozn. hodnota DOMENA st. 1 pro Ventil – velká degradace leží mimo graf (=778 mV))



Graf 3.5 Zobrazení hodnot po prvních pulzech z každého měřicího cyklu vzorku JS24 (střed) pro ukázkou zpřesňování měření a demonstraci stability magnetické skvrny v časovém horizontu 25 vteřin po magnetickém pulzu



Graf 3.6 Zobrazení hodnot po druhých pulzech z každého měřicího cyklu vzorku JS24 (střed) pro ukázkou zpřesňování měření a demonstraci stability magnetické skvrny v časovém horizontu 25 vteřin po magnetickém pulzu

3.6 Původní měření

Kvůli nemožnosti měnit nastavení CASTY bylo rozhodnuto porovnat výsledky starších měření a z nich nalézt vzorce pro kompenzaci rozdílné vnesené energie a pro výpočet tvrdosti či určování obsahu strukturních složek. Dále pak nalézt známky magnetické relaxace materiálu.

3.6.1 Vzorky původních měření

Tab. 3.19 Seznam původních protokolů měření s informací o měřených vzorcích a změřenou hodnotou zbytkové magnetizace.

Označení protokolu o měření	Druh a obsah grafitu	Matrice % (ferit/perlit)	Další chem. složení z tab. 3.20	Tvrdost HB	M [mV]
5 – P13	85% KG, 15% ČG	87 / 13	13/81 MŽOL	172	157,5
6 – P13	85% KG, 15% ČG	87 / 13	13/81 MŽOL	172	161,9
7 – P3	30% KG, 30% ČG	97 / 3	11/34 MŽOL	164	158,8
8 – P13	40% KG, 60% ČG	87 / 13	11/11 MŽOL	171	155,0
9 – P20	50% KG, 50% ČG	80 / 20	12/74 MŽOL	172	150,9
10 – P20	50% KG, 50% ČG	80 / 20	12/74 MŽOL	172	158,5
11 – P94	100 % LG	6 / 94	2/24 MŽOL	190	649,2
12 – P94	100 % LG	6 / 94	2/24 MŽOL	190	616,7
13 – P13	55% KG, 45% ČG	87 / 13	12/41 MŽOL	170	169,2
14 – P13	55% KG, 45% ČG	87 / 13	12/41 MŽOL	170	165,0
15 – Cejch CASTA	100 % KG	0 / 100	-	210	1129,1
17 – Cejch CASTA	100 % KG	0 / 100	-	210	1061,4
18 – Cejch CASTA	100 % KG	0 / 100	-	210	1026,8
25 – ocel 196 HB	-			196	584,4
27 – ocel 14220.1	14220.1 (C 0,14 – 0,19; Mn 1,1 – 1,4; Cr 0,8 – 1,3)			170	199,1
28 – P0	100 % KG	100 / 0	-	168	188,1
30 – P100	100 % KG	0 / 100	-	270	619,6

32 – P100	100 % LG	0 / 100	-	215	647,4
33 – P100	100 % LG	0 / 100	-	215	637,6
35 – P0	100 % LG	100 / 0	-	131	201,7
38 – hlava	100 % LG	-	Odřezek měkké hlavy válců	130	278,6

Tab. 3.20 Chemická analýza vzorků MŽ Olomouc:

%	C	Si	Mn	S	Mg	tvrdost
2/24	3.61	2.14	0.28	0.03	0.004	190
12/74	3.52	2.68	0.17	0.017	0.032	172
11/34	3.39	2.55	0.14	0.018	0.021	164
11/11	3.39	2.6	0.14	0.017	0.023	171
12/41	3.52	2.61	0.17	0.016	0.031	170
13/81	3.49	2.55	0.17	0.016	0.037	172

3.6.2 Posouzení vlivu rozdílných hodnot vnesené energie

Bylo provedeno opakované měření na třech vzorcích (Etalon CASTA, JS14 (střed), vzorek 297). Spočívalo ve třech po sobě následujících měřeních (kdy se každé skládalo z 5 cyklů = 10 magnetických pulzů pro dosažení co nejvyšší přesnosti), při připojení napájení k počítači. ΔU_c pravidelně 74 nebo 73. Dále bylo napájení přepojeno na akumulátor, provedena další tři měření ΔU_c 71 nebo 70, napájení opět připojeno k počítači a provedena závěreční 3 měření. Celý soubor devíti měření pro každý vzorek byl proveden se zafixovanou vzájemnou polohou sondy a vzorku.

Cílem bylo pozorovat vliv změny vnesené energie (v tomto případě činil rozdíl 3 V, což jsou asi 4 %) na výstupní hodnoty. Z výsledků zpracovaných v tabulkách 3.21, 3.22 a 3.23 vyplývá, že změna vnesené energie takovéto velikosti nemá na vystupující hodnoty žádný rozhodný vliv. Odchytky jednotlivých měření jsou v desetinách procent.

Tab 3.21 Etalon CASTA

ΔU_c při 9. pulzu [V]	74	74	74	70	71	71	74	73	74
ΔU_c při 10. pulzu [V]	74	74	74	71	71	71	73	74	74
M [mV]	1097,8	1097,0	1097,5	1096,8	1097,2	1096,6	1096,6	1096,3	1094,8
\emptyset	1097,43			1096,87			1095,90		

Tab 3.22 JS14 (střed)

ΔU_c při 9. pulzu [V]	74	74	74	71	70	71	74	73	74
ΔU_c při 10. pulzu [V]	73	73	74	71	70	71	73	73	73
M [mV]	354,1	352,6	353,7	353,8	353,7	354,2	353,5	353,1	352,7
\emptyset	353,47			353,9			353,1		

Tab 3.23 Vzorek 297

ΔU_c při 9. pulzu [V]	74	74	73	71	71	71	74	73	73
ΔU_c při 10. pulzu [V]	73	74	74	71	70	71	73	74	73
M [mV]	197,9	198,2	198,7	198,3	197,8	197,2	198,6	196,7	197,3
\emptyset	198,27			197,77			197,53		

Porovnání naměřených hodnot v závislosti na velikosti vnesené energie způsobené nedostatečným nabitím kondenzátoru

Objektivně lze porovnat pouze hodnoty naměřené na **Etalonu CASTA**, neboť jsou dostupné jak protokoly ze tří starších měření, tak vzorek samotný, pro provedení aktuálního měření. První 4 hodnoty jsou měření nová, se změnou napětí na kondenzátoru při jeho vybití o 74 (73) V. Další 3 sloupce jsou potom průměrné hodnoty změny zbytkové magnetizace M ze starších protokolů (15 až 18 – Cejch CASTA) změna napětí na kondenzátoru asi 61 V.

Tab. 3.24 Rozdílné magnetizace stejného vzorku

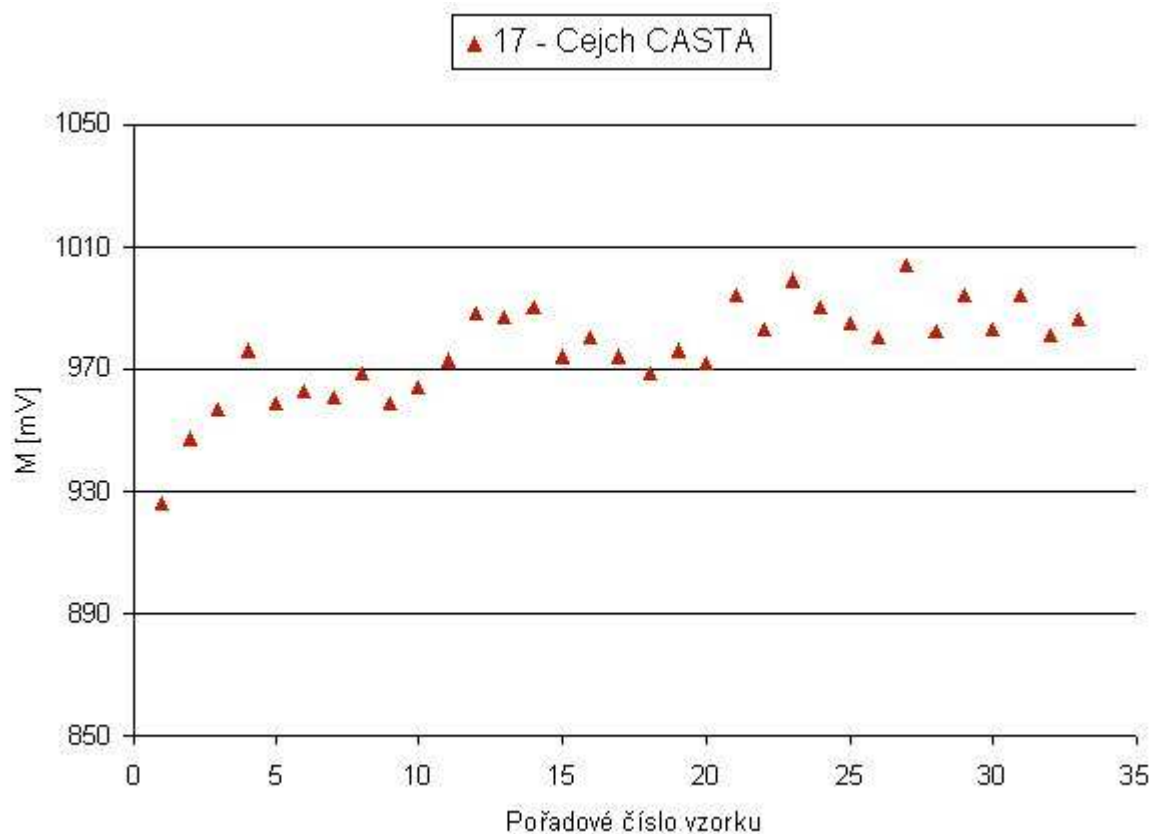
ΔU_c při 2. pulzu [V]	74	74	74	74	60	62	61
ΔU_c při 3. pulzu [V]	74	73	74	74	60	60	61
M [mV]	1092,8	1059,4	1030,5	1070,6	1129,1	1061,4	1026,8
\emptyset	1063,3				1072,433		

Jak bylo výše ukázáno, nezáleží na rozdílu jednotek voltů v rámci jednotlivých magnetických pulzů. I když energie vnesená do materiálu během magnetických pulzů dosahuje jen 80% velikosti v porovnání se současným stavem, není z *tabulky 3.24* patrný žádný na tomto faktu závislý posun k vyšším nebo nižším hodnotám. Hodnoty mají pouze větší odchylku od společného průměru, což mohlo být způsobeno ručním přidržováním přístroje během měření. V tomto případě tedy kompenzace nižší vnesené energie není nutná. O ostatních materiálech to říct nelze, vzorky nejsou k dispozici pro měření s plnou magnetizací.

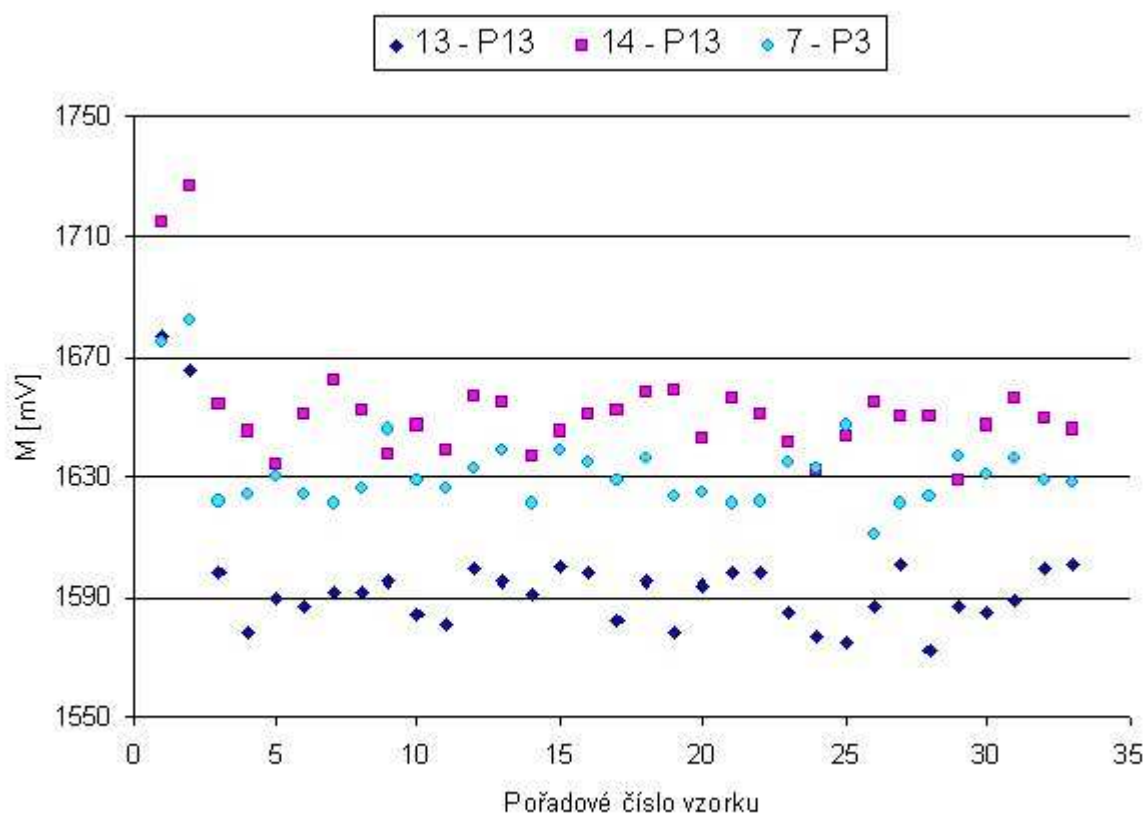
Možnost kompenzace, pokud by se prokázal vliv rozdílné magnetizace na výstupy, by bylo vhodné podrobit dalšímu zkoumání s funkčním přístrojem.

3.6.3 Magnetická relaxace materiálu

Na čtyřech vzorcích byl upozorován výskyt magnetické relaxace během několika prvních vzorků na začátku měření. Ve všech těchto případech se relaxace projevila pouze po prvním magnetickém pulzu. Možné vysvětlení je, že tento jev je patrně pozorovatelný jen při měření demagnetizovaného vzorku a to max. asi do 500 ms po pulzu (odhadnuto z protokolu měření dle rychlosti nabíjení kondenzátoru). Vždy se jednalo o měření z doby plné funkčnosti CASTY. Průběh relaxace je zobrazen v *grafech 3.7 a 3.8*. V prvním jsou hodnoty z protokolu 17 – Cejch CASTA vzorku Etalon CASTA, ve druhém hodnoty z protokolů 13 – P13, 14 – P13 a 7 – P3. Protokoly 13 – P13 a 14 – P13 jsou nejspíš z měření na stejném materiálu (časový odstup měření byl 2 měsíce), odtud lze usuzovat na opakovatelnost pozorování. Byl tedy proveden pokus na Etalonu CASTA, ale snad z důvodu častého měření na vzorku v poslední době se jej nepodařilo opakovat.



Graf 3.7 Průběh magnetické relaxace po 1. pulzu měření (Etalon CASTA)



Graf 3.8 Průběh magnetické relaxace po 1. pulzu měření (13 a 14 – P13, 7 – P3)

Je třeba si všimnout, že hodnoty Etalonu se „přibližují“ k průměrné hodnotě více zvolna. Nárůst je patrný až k 20. vzorku (odpovídá 2,5 vteřinám). Při ostatních třech měřeních byly vždy dva vzorky výrazně v jiných hodnotách a poté skokem přešly k průměrným hodnotám. Toto odlišné chování může být způsobeno vlivem feritické matrice (Etalon je perlit). Potenciálně to může být další parametr rozlišující strukturu.

3.6.4 Určení vzorců k výpočtu tvrdosti a u litin obsahu perlitu

Pro nalezení závislostí bylo potřeba vybrat z materiálů skupiny ocelí a litin s kuličkovým a lupínkovým grafitem. Body v grafech byly spojeny regresními křivkami a zobrazeny rovnice spojnic a koeficienty spolehlivosti.

Tab. 3.25 Litiny s kuličkovým grafitem

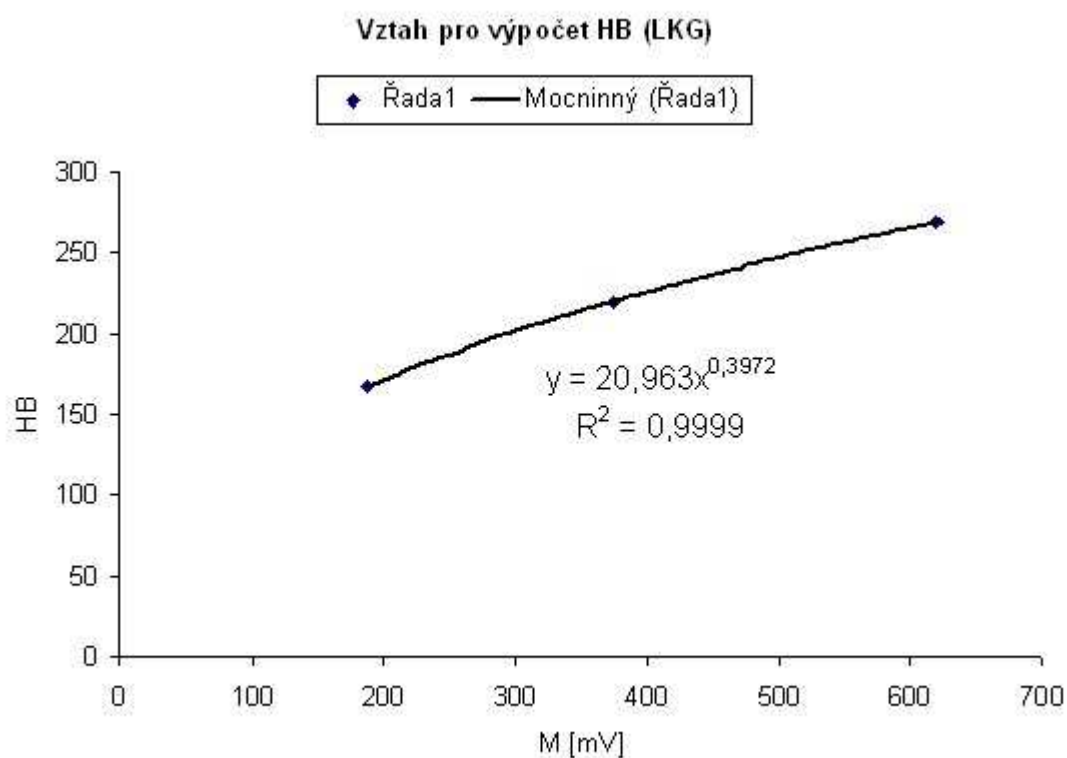
Ozn. protokolu / vzorek	% perlitu	Tvrdost HB	M [mV]
28 – P0	0	168	188
30 – P100	100	270	620
JS24 (střed)	20	220	375

Tab. 3.26 Litiny s lupínkovým grafitem

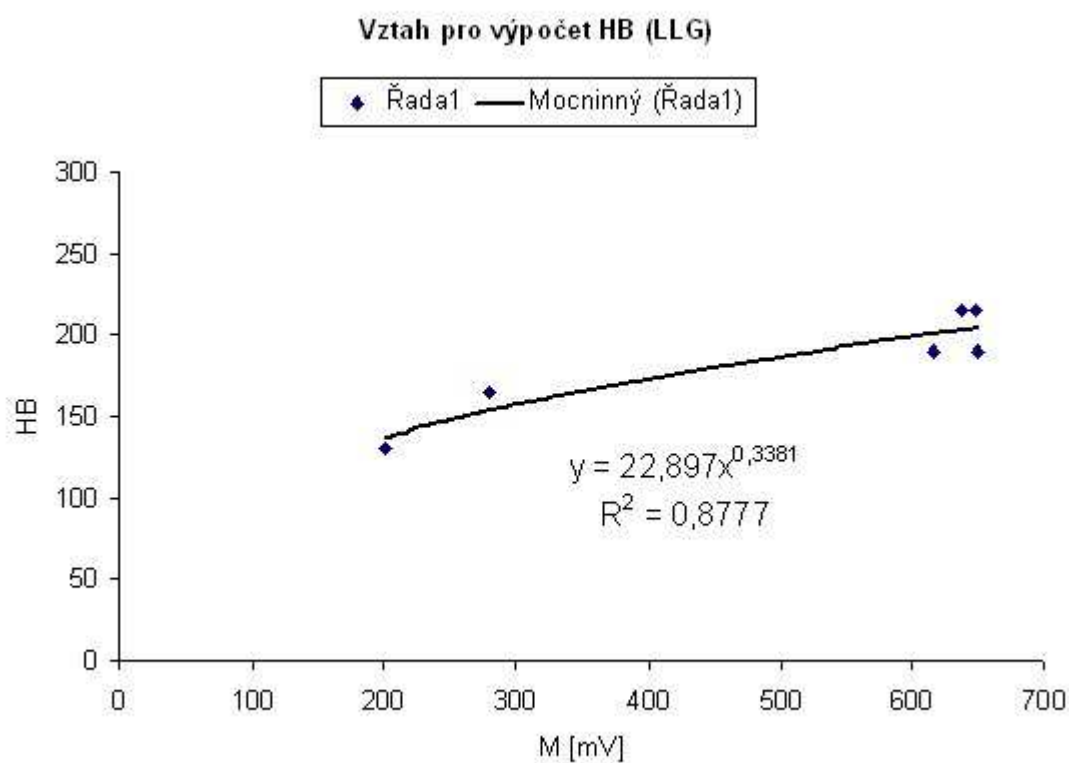
Ozn. protokolu / vzorek	% perlitu	Tvrdost HB	M [mV]
11 – P94	94	190	649
12 – P94	94	190	617
32 – P100	100	215	647
33 – P100	100	215	637
35 – P0	0	131	375
JS24x (střed)	10	165	280

Tab. 3.27 Oceli

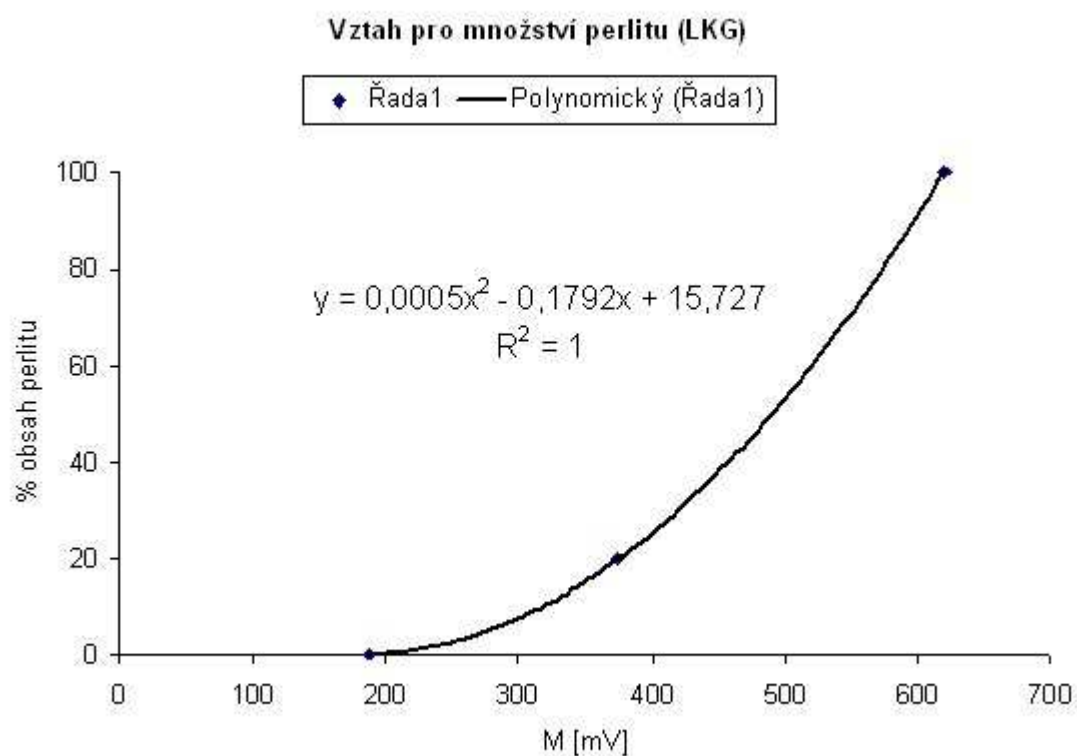
Ozn. protokolu / vzorek	Tvrdost HB	M [mV]
25 – ocel 196 HB	196	584,4
27 – ocel 14220.1	170	199,1
Plech 9 mm	230	943,8



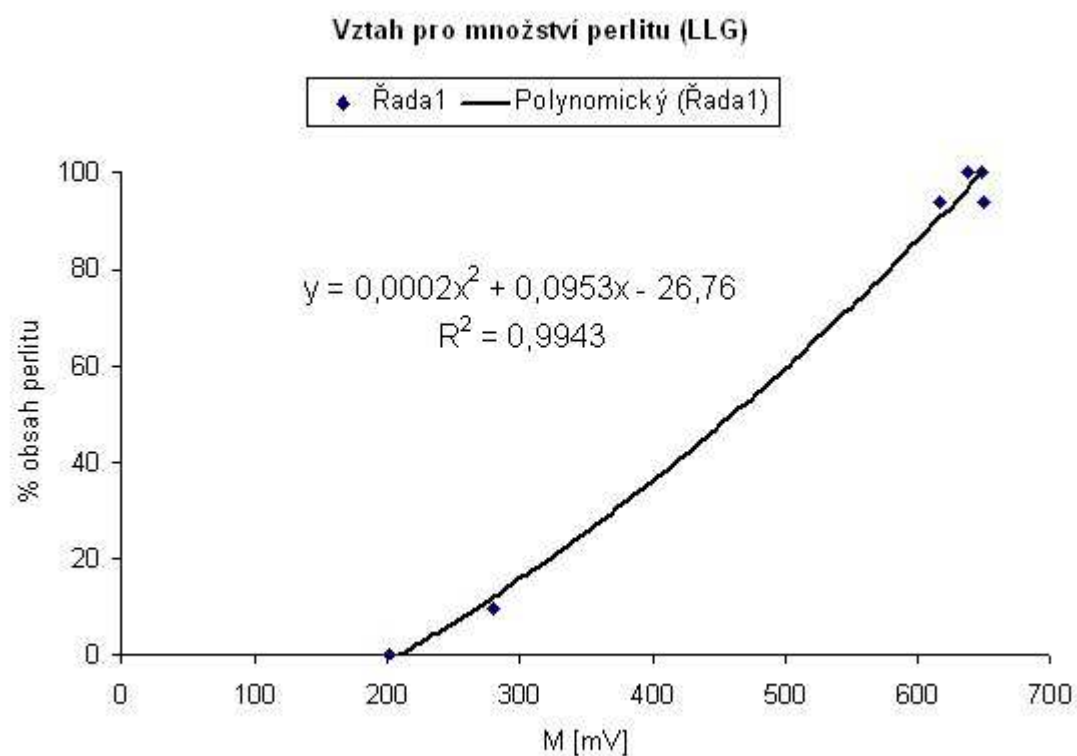
Graf 3.9 Nalezení vztahu pro výpočet tvrdosti litin s kuličkovým grafitem



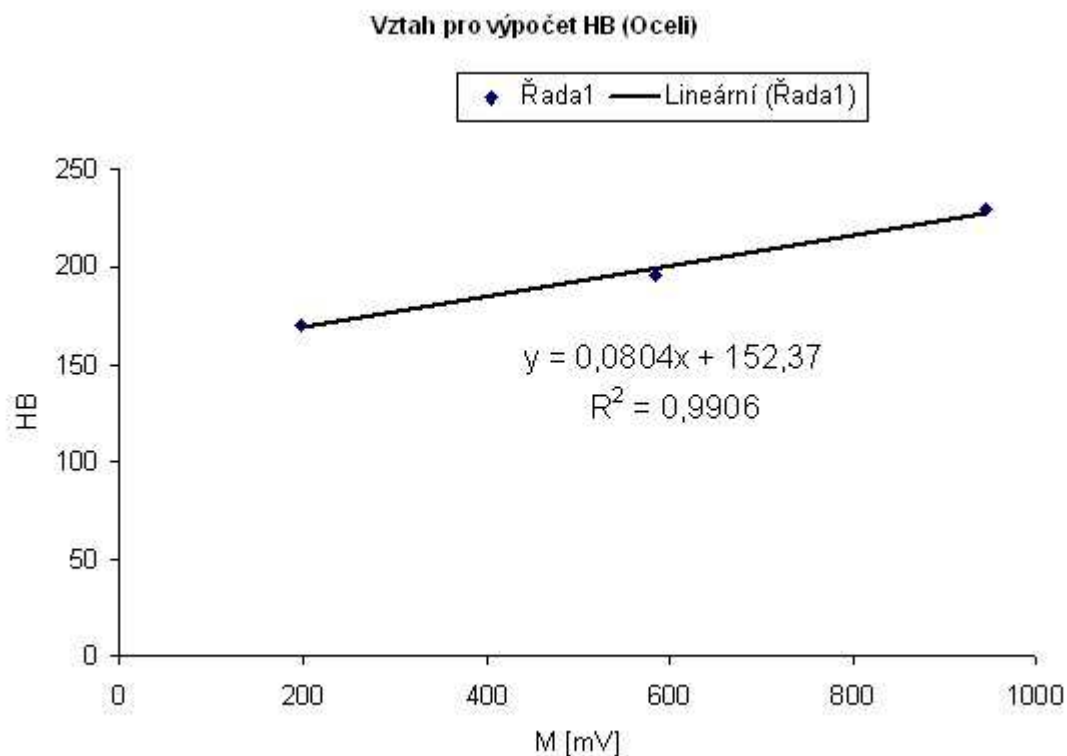
Graf 3.10 Nalezení vztahu pro výpočet tvrdosti litin s lupínkovým grafitem



Graf 3.11 Nalezení vztahu pro výpočet obsahu perlitu pro litiny s KG



Graf 3.12 Nalezení vztahu pro výpočet obsahu perlitu pro litiny s LG



Graf 3.13 Nalezení vztahu pro výpočet tvrdosti ocelí

Shrnutí získaných vzorců

Hodnoty M ovlivňuje i obsah legujících prvků v materiálu. U více jak poloviny použitých vzorků není obsah znám, proto budou vzorce jistě zatíženy chybou.

Tvrdość litin s kuličkovým grafitem:

$$HB = 20,963 \cdot M^{0,3972} \quad (15)$$

Tvrdość litin s lupínkovým grafitem:

$$HB = 22,897 \cdot M^{0,3381} \quad (16)$$

Tvrdość ocelí:

$$HB = 0,0804 \cdot M + 152,37 \quad (17)$$

Procentuální obsah perlitu v litině s kuličkovým grafitem:

$$\%P = 0,0005 \cdot M^2 - 0,1792 \cdot M + 15,727 \quad (18)$$

Procentuální obsah perlitu v litině s lupínkovým grafitem:

$$\%P = 0,0002 \cdot M^2 + 0,0953 \cdot M - 26,760 \quad (19)$$

Nalézt aspoň trochu spolehlivé vzorce pro ostatní zkoumané materiály, například pro výpočet množství kuličkového / červíkovitého grafitu v litině s relativně stejnou matricí a tvrdostí, kvůli kterému bylo podle informace od doc. Skrbka měření patrně prováděno, dost dobře nelze. CASTOU naměřené hodnoty jsou z porovnání dvojic shodných materiálů zatíženy chybou měření i o 5 %. Taková chyba už stačí k tomu, aby dokázala soubor výsledků, který je v rozmezí hodnot 150 až 170 mV, značně znehodnotit.

Samozřejmě nelze porovnávat všechny zbylé materiály společně, ale některé očividné závislosti, jako právě změna poměru kuličkového a červíkovitého grafitu, při jinak nezměněném poměru všech ostatních složek, by měla vykazovat byť jen minimální systematičnost změn hodnot. Situaci ukazuje *tabulka 3.28*. Pro klesající obsah KG hodnota M nejprve roste, potom opět klesá. Přibližně parabolická závislost, která by z těchto hodnot vzešla, se nejeví jako spolehlivá.

Tab. 3.28 Porovnání obsahu KG a změřené M při jinak stejném materiálu.

Označení protokolu o měření	Druh a obsah grafitu	Matrice % (ferit/perlit)	Další chem. složení z <i>tab. 3.20</i>	Tvrdost HB	M [mV]
5 – P13	85% KG , 15% ČG	87 / 13	13/81 MŽOL	172	157,5
6 – P13	85% KG , 15% ČG	87 / 13	13/81 MŽOL	172	161,9
13 – P13	55% KG , 45% ČG	87 / 13	12/41 MŽOL	170	169,2
14 – P13	55% KG , 45% ČG	87 / 13	12/41 MŽOL	170	165,0
8 – P13	40% KG , 60% ČG	87 / 13	11/11 MŽOL	171	155,0

3.6.5 Odhad totožnosti neznámých materiálů

Tab. 3.29 Orientační odhad na typ materiálu

Označení protokolu	M [mV]	Odhadované materiály
1 – 616	160,8	Oboje nejspíš litina s obsahem perlitu do 20 %
2 – 225	162,7	
3 – 618	203,8	Feritická LLG, nebo ocel 14220.1
4 – 019	1131,1	Hlava ventilu z aust. oceli s velkou feritickou degradací
19 – 724	1006,2	Může být ocelový plech o nižší tloušťce např. 4 mm

Jednoznačné určení materiálu z hodnoty zbytkové magnetizace, není bez alespoň základních znalostí o materiálu reálné.

3.6.6 Cejchování přístroje CASTA

Pro kalibraci přístroje by bylo nejvhodnější vyrobit etalon z magneticky tvrdého materiálu, případně sadu několika etalonů přesně určeného složení, na kterých by se před začátkem měření provedl test. Je však třeba zabránit chybám (například přiblížením sondy moc blízko k okraji etalonu, nebo neúmyslným částečným odklopením sondy od povrchu) při cejchování. Toho by bylo možné dosáhnout výrobou sady etalonů tvarově shodných se sondou. Při cejchování by se sonda umístila do mělké tvarové prohlubně, čímž by mělo být dosaženo vzájemného bezchybného ustavení a stability uspořádání během měření. Vlastní měření by pak také mělo být prováděno s náležitou pečlivostí. Změny hodnot od průměrů by se potom mohly promítnout do vzorců pro výpočty vlastností.

Pro nově navržený přístroj by ale bylo perspektivnější zavést do souboru CASTA.ini proměnnou, která by vztahovala naměřené hodnoty k hodnotě etalonového vzorku (stejně ocejchování jako u DOMENY, jen zapsání hodnoty by bylo do souboru a ne na obrazovku).

Další proměnné, které už nesouvisí s cejchováním, by umožňovaly, jako je tomu v současnosti u DOMENY, vložením konstant vypsát rovnou hodnoty hledané vlastnosti. V nejjednodušším případě například pro lineární závislost tvrdosti ocelí. Nabízí se zde ale možnost do programu zavést více různých matematických vztahů a z nich pak volbou hodnoty další proměnné vybírat nejvhodnější závislost. To by bylo vhodné při následném použití ve výrobních provozech. Navíc by tu asi byla i určitá možnost dalšího rozšíření sady vzorců v programu o „zapomenuté“ při prvním programování, nebo o přesnější závislosti.

4 DISKUSE VÝSLEDKŮ A SHRnutí

Přístroj CASTA se podařilo k počítači připojit pomocí RS 232, přes redukci na USB však ne. Byl zaznamenán určitý rozdíl v hodnotách nabití kondenzátoru v závislosti na užitém napájení (z baterie 92 V; z počítače 95 V)

Měnit parametry měření se nepodařilo. Přístroj nereaguje na vstupy v souboru Casta.ini a měří v jednom stálém cyklu složeném ze dvou magnetických pulzů. Měření je zbytečně časově náročné.

Bylo ověřeno, že pro běžná měření stačí použití tří po sobě následujících magnetických pulzů. Dalším magnetováním se sice v rámci jednoho cyklu dosáhne větší přesnosti, ale při opakování měření ve stejném místě se výsledky liší mnohem více, než o kolik se zpřesní vícenásobným magnetováním.

Protože doba nabíjení pracovního kondenzátoru na maximální hodnotu je přibližně 10 vteřin, bude v případě nastavení funkčního přístroje na 3 pulzy trvat jedno měření minimálně půl minuty, což je 10x déle než měření přístrojem DOMENA. V případě návrhu nového přístroje je třeba zásadně zkrátit dobu nabíjení (DOMENA nabíjí během jedné vteřiny).

Z porovnání naměřených hodnot vyplynulo následující:

Závislost vlivu kvality povrchu na hodnoty zbytkové magnetizace se určit nepodařilo. Pravděpodobně do měření vstupují další neznámé faktory.

Na nízkou tloušťku materiálu (3mm plech vs. 9mm) metoda reaguje velmi přesně. U obou měření DOMENOU i u měření CASTOU dosáhly hodnoty podobné změny (zvýšení o 50 – 70 %) pravděpodobně také závislé na velikosti magnetizační energie.

Především měření přístrojem DOMENA ukázala velmi odlišnou odezvu materiálu ventilů v závislosti na jejich feritické degradaci při odlišném stupni magnetizace. Jak vyplývá z *tab. 3.17*, pro spojitě feromagnetikum (ocel) vede zvýšení intenzity magnetizace ke zvýšení *M*. Pro velmi řídké feromagnetikum (hlavy ventilů - vyprecipitované částice feromagnetika v paramagnetiku) se zvýšením magnetizace relativně vyvolá podstatně nižší *M*. Pro další měření ventilů CASTOU by bylo vhodné vyřešit zafixování polohy ventilu vůči sondě.

Několikanásobným měřením bylo prokázáno, že malá změna vnesené energie do materiálu nemá na změřené hodnoty žádný rozhodující vliv.

Pro LLG, LKG a oceli byly určeny vzorce pro výpočet tvrdosti z hodnoty M, pro oba druhy litiny pak ještě vzorce pro výpočet obsahu perlitu ve struktuře. Protože tvar grafitu (lupínkový / kuličkový) v litinách ovlivňuje demagnetizační činitel, nelze oba druhy litin rozlišovat podle jednoho vzorce.

Bylo zaznamenáno úspěšné pozorování magnetické relaxace těsně po prvním magnetickém pulzu na čtyřech vzorcích. Na jednom z nich, na etalonovém vzorku CASTA, by mohlo být pozorování v budoucnu opakováno.

Byl navržen teoretický způsob cejchování přístroje před měřením, založený na sadě přesných vzorků a nutnosti přesného vzájemného ustavení vzorku a sondy.

Jak bylo zmíněno, v současné době se používají magnetické pulzy stejné intenzity v rámci každého měření. Nové poznatky by mohla přinést možnost nastavit velikost startovacího napětí kondenzátoru, ne však pouze pro celý měřicí cyklus, jako je tomu u přístroje DOMENA B3.b (nastavení stupně magnetizace 1 až 8), ale i v rámci jednoho měření pro jednotlivé magnetické pulzy. Toho by mohlo být dosaženo buď sadou několika kondenzátorů, což by však stále ještě znamenalo určité omezení nastavení pouze na hodnoty velikosti kapacity každého z nich, nebo softwarovým nastavením nabití kondenzátoru pro každý jednotlivý pulz.

5 ZÁVĚR

Současný stav přístroje CASTA jej vylučuje z reálného nasazení ať už v provozních podmínkách, tak i v laboratoři.

Zastaralé připojení prostřednictvím RS 232 a nezdařené pokusy o připojení pomocí redukce na USB limitují jeho použití na součinnost pouze se stolními počítači (případně se staršími notebooky) vybavenými RS 232. Ustrnutí měřicího cyklu na dvou magnetických pulzech a tudíž nutnost provést ihned po skončení prvního cyklu cyklus druhý, pro získání hodnot po 3. magnetickém pulzu, prodlužuje jedno měření s vyhodnocením změřených hodnot minimálně na 3 minuty. Proti konkurenční DOMENĚ, kdy po třech vteřinách je na displeji zobrazena hodnota, je čas pro získání stejné informace CASTOU neúměrně dlouhý. Nemožnost změnit jakékoliv parametry měření také hovoří proti dalšímu nasazení tohoto přístroje.

Jako perspektivní se jeví navrhnout přístroj nový s připojením přes USB, s možností nastavení velikosti magnetizace pro každý pulz, s rychlým nabíjením pracovního kondenzátoru a výstupem do Excelu pro rychlejší vyhodnocení změřených hodnot. I když bylo řečeno, že pro uspokojivé výsledky stačí 3 pulzy, pro přesnější měření a alternativu magnetování materiálu pulzy o různé intenzitě by neměla chybět možnost nastavit větší počet pulzů. Například pro vzorky ventilů by tak mohlo být užito zmagnetování třemi pulzy nízké intenzity následované třemi pulzy vysoké intenzity během jednoho měření a tím měřit obsah („hustotu“) feromagnetických částic v materiálu.

Program by dále měl být rozšířen o sadu matematických vztahů a jim příslušné proměnné pro přímé zobrazení hodnot požadovaných vlastností, například tvrdosti a o možnost cejchování, jak je navrženo v části 3.6.6.

Protože nepřesných výsledků mohlo být dosahováno použitím pouze jedné sondy ve snímači, zapojením dvou Hallových sond v ose magnetizační cívky (první u měřeného povrchu, druhá minimálně 10 mm nad ní) by mohly být potlačeny některé rušivé vlivy.

Použitá literatura

- [1] <http://konference.tanger.cz/data/metal2007/sbornik/Lists/Papers/121.pdf>
(2. března 2010)
- [2] Skrbek, B. Metoda magnetické skvrny : teze profesorské přednášky.
Technická univerzita v Liberci, Liberec 2008, ISBN 978-80-7372-428-3.
- [3] Dvořák, J. Akustická emise magnetických impulzů metody magnetického bodového pólu. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2008.
- [4] Netáhlo, P. Měření metodou magnetického bodového pólu na tenkých stěnách ocelí a litin. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2005.
- [5] Kreidl, M., Šmíd, R. Technická diagnostika : senzory – metody – analýza signálu. BEN - technická literatura, 4. díl, Praha 2006, ISBN 80-7300-158-6.
- [6] Kopec, B. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. CERM, Brno 2008, ISBN 978-80-7204-591-4.
- [7] Věchet, M., Kesl J. Defektoskopie v otázkách a odpovědích. SNTL, Praha 1989, ISBN 80-03-00100-5.
- [8] Skrbek, B. Využití interakce struktury litiny s akustickými vlnami. In Vědecká pojednání. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2001, s. 245-250.
- [9] Flanderka, M. Magnetická strukturoskopie netryskaných výkovků a odlitků. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2008.
- [10] Grus, M. Vztah strukturně-mechanických a magnetických vlastností vybraných ocelí. Technická univerzita v Liberci, Liberec 2004.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum 28. 5. 2010

Podpis

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and consultant.

Date 28. 5. 2010

Signature